

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
1. Общие сведения о коротких замыканиях	4
2. Короткое замыкание в симметричной трехфазной цепи	5
3. Электродинамическое действие токов короткого замыкания	12
4. Термическое действие токов короткого замыкания	13
5. Выбор исходных условий для расчета токов короткого замыкания	18
6. Составление и преобразование схемы замещения	21
7. Применение системы относительных единиц для расчета токов короткого замыкания	28
8. Параметры элементов расчетной схемы	34
9. Вычисление начального значения периодической слагающей тока трехфазного короткого замыкания	41
10. Вычисление ударного тока короткого замыкания	74
11. Определение периодической слагающей тока трехфазного короткого замыкания для моментов времени до 0,5 с	75
12. Общие представления о несимметричных коротких замыканиях	89
13. Проверка аппаратов и проводников по токам короткого замыкания	123
Приложение. Определение расчетной э. д. с. и индуктивного сопротивления генератора для начального момента короткого замыкания	132
Список литературы	3-я стр. обложки

Редакционная коллегия:

В. Н. Андриевский, С. А. Бажанов, Ю. И. Зайцев, В. П. Ларионов, Э. С. Мусаэлян, С. П. Розанов, В. А. Семенов, А. Д. Смирнов, А. Н. Трифонов, П. И. Устинов, А. А. Филатов

Беляева Е. Н.

Б 44 Как рассчитать ток короткого замыкания.—2-е изд. перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1983.— 136 с., ил. — (Б-ка электромонтера. Вып. 544)

35 к.

Дано краткое изложение способов расчета токов к. з. в электроустановках выше 1000 В, иллюстрированное примерами. Первое издание вышло в 1964 г. Во втором издании материал переработан в соответствии с новыми РУ по расчету токов к. з., учтены новые ГОСТ на аппараты, машины, системы единиц.

Для квалифицированных электромонтеров, бригадиров и мастеров электроцехов как практическое пособие по расчетам токов короткого замыкания.

2302040000-067
Б **051(01)-83** **114-82**

ББК 31.27

6П2.11

ЕВГЕНИЯ НИКОЛАЕВНА БЕЛЯЕВА

Как рассчитать ток короткого замыкания

Редактор **В. А. Семенов**

Редактор издательства **Л. В. Конейкина**

Технический редактор **В. В. Хапаева**

Корректор **И. А. Володьева**

ИБ № 2847

Сдано в набор 23.08.82. Подписано в печать 28.12.82. Т-23462. Формат 84×108^{1/32}. Бумага типографская № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 7,14. Усл. кр.-отт. 7,46. Уч.-изд. л. 6,98. Тираж 60 000 экз. Заказ № 206. Цена 35 к.

Энергоатомиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Владимирская типография «Союзполиграфпрома» при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли 600000, г. Владимир, Октябрьский проспект, д. 7

Необходимость определения токов короткого замыкания в процессе эксплуатации может возникнуть:

при изменении схемы питания энергетического объекта для проверки электрооборудования высокого напряжения на термическое и электродинамическое действие токов короткого замыкания, пригодности существующих уставок релейной защиты, средств грозозащиты и т. д.;

При частичной замене электрооборудования на электростанции или подстанции, если намеченные к установке машины и аппараты по своим паспортным данным отличаются от демонтируемых; если проектные данные по объекту отсутствуют или устарели и токи короткого замыкания в данный момент неизвестны обслуживающему персоналу. Возможны и другие случаи, когда вследствие изменения условий эксплуатации требуется выполнять расчеты токов короткого замыкания.

Назначение книги — на практических примерах научить электротехнический персонал расчетам токов короткого замыкания.

Настоящее издание книги существенно отличается от предыдущего издания 1964 г. в связи с тем, что при переиздании была поставлена задача привести книгу в соответствие с разработками руководящих указаний по расчету коротких замыканий, выбору и проверке аппаратов и проводников по условиям короткого замыкания кафедры электрических станций Московского энергетического института. Все числовые примеры, приведенные в книге, переработаны или составлены заново.

Замечания и пожелания читателей по данной книге следует направлять по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10, Энергоатомиздат.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

Коротким замыканием (к. з.) называется нарушение нормальной работы электрической установки, вызванное замыканием фаз между собой, а в системах с заземленной нейтралью также замыканием фаз на землю.

Короткие замыкания в электроустановках возникают в результате пробоев и перекрытий изоляции электрооборудования, набросов, ошибочных действий персонала и по многим другим причинам.

При к. з. токи в фазах установки увеличиваются по сравнению с их нормальным значением, а напряжения снижаются. В трехфазной электрической сети возможны: трехфазное, двухфазное, двухфазное на землю и однофазное к. з.

Виды к. з. в трехфазной сети и их обозначения приведены на рис. 1 (а—г).

Для прохождения тока однофазного к. з. необходимо, чтобы на участке сети, где произошло повреждение, была заземленная нулевая точка трансформатора, электрически связанная с местом к. з. (рис. 1, г).

Как правило, в месте к. з. возникает электрическая дуга, которая вместе с сопротивлениями элементов пути тока к. з. образует переходное сопротивление. Непосредственное к. з. без переходного сопротивления в месте повреждения называется металлическим к. з.

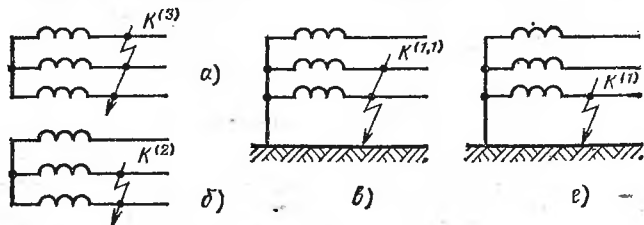


Рис. 1. Виды коротких замыканий.

а — трехфазное; б — двухфазное; в — двухфазное на землю; г — однофазное.

В данной книге рассматриваются только металлические к. з.

Пренебрежение переходным сопротивлением значительно упрощает расчет и дает максимально возможное при одних и тех же исходных условиях значение тока к. з. Для выбора аппаратуры, например, необходим именно такой расчет; при расчетах релейной защиты возможное снижение значения тока за счет переходного сопротивления в месте к. з. учитывается введением специального коэффициента.

2. КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ В СИММЕТРИЧНОЙ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ

Для того чтобы ознакомиться с сущностью явления к. з., достаточно остановиться на наиболее простом повреждении — трехфазном к. з.

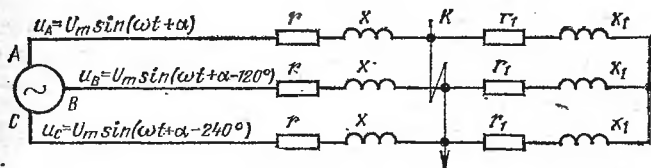


Рис. 2. Трехфазное к. з. в симметричной цепи.

Если трехфазная цепь симметрична, т. е. сопротивления фаз равны между собой, замыкание всех фаз в одной точке (рис. 2) приводит к уменьшению их сопротивления, но не нарушает симметрии токов и напряжений. По сравнению с режимом нагрузки токи в цепи возрастают, а напряжения уменьшаются. Угол сдвига ϕ между током и напряжением, как правило, увеличивается за счет исключения из схемы активных сопротивлений нагрузки, достигая 90° при чисто индуктивном сопротивлении цепи.

Изменение тока в процессе короткого замыкания. Ток к. з. изменяется в процессе короткого замыкания (рис. 3) по сложному закону, зависящему от многих факторов: мощности источника питания, времени затухания апериодических токов, наличия автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) на генераторах и т. п.

В левой части графиков изображены кривые токов предшествующего нагрузочного режима. Пересечение оси

токов i с осью времени t соответствует моменту возникновения к. з. В правой части графиков показаны кривые токов i_k , i_n и i_a . Кривая i_k изображает ток к. з., фактически протекающий по цепи, или полный ток к. з. Кривые

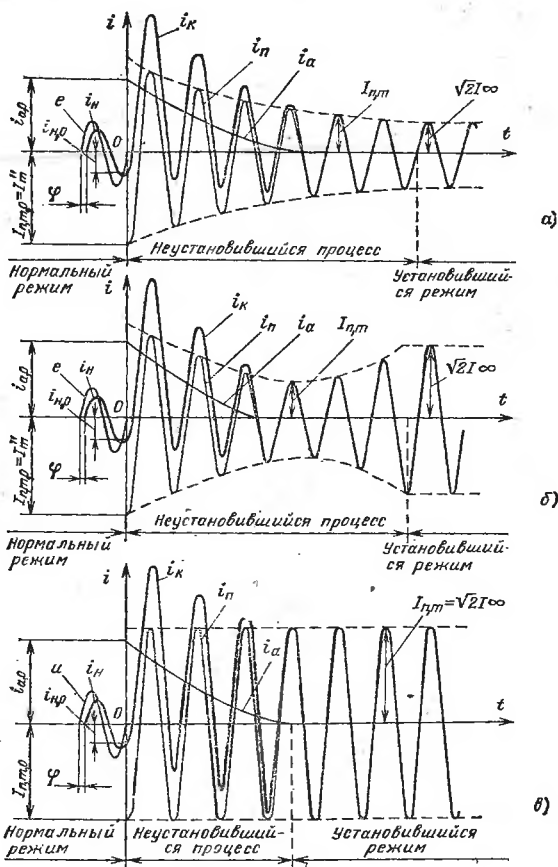


Рис. 3. Кривые изменения тока трехфазного к. з.

а — в цепи синхронного генератора без АРВ; б — в цепи синхронного генератора с АРВ; в — в цепи, питающейся от энергосистемы.

i_n и i_a соответствуют периодической и аperiodической составляющим полного тока i_k . В качестве общего положения при составлении графиков было принято, что индуктивное сопротивление цепи к. з. значительно преобладает

ет над активным и периодическая слагающая i_n отстает по фазе от э. д. с. примерно на 90° .

Часть процесса, которая характеризуется изменением амплитудных значений тока к. з., принято называть неустановившимся процессом. В установившемся режиме амплитуды тока к. з. постоянны.

В зависимости от того, изменяется э. д. с. источника во время к. з. или нет, протекание процесса к. з. и длительность перехода к установившемуся режиму будут различными.

Рассмотрим трехфазное к. з. для следующих случаев питания сети: от генератора без АРВ, от генератора с АРВ и от энергосистемы.

Под определением «энергосистема», или «электрическая система», которым часто пользуются при расчетах токов к. з., подразумевается мощный источник питания, напряжение на шинах которого остается постоянным при любых изменениях режима сети — сбросах нагрузки, перегрузках или коротких замыканиях. Внутреннее сопротивление такого источника принимается равным нулю ($x_{с,вн}=0$, $r_{с,вн}=0$).

Свойства системы как источника питания широко используются в практике расчетов токов к. з. В самом деле, если требуется определить максимально возможный ток к. з., его предельное значение за элементом электрической схемы, например за трансформатором или реактором, то достаточно этот элемент условно подключить к шинам электрической системы. Методы вычислений рассмотрены в § 9.

Если удаление точек к. з. от шин источника питания характеризуется значительными сопротивлениями (§ 11), можно считать, что при к. з. не происходит изменения напряжения на шинах и значение периодического тока к. з., определяемое в данном случае напряжением источника, также не изменяется в течение к. з. Условие неизменности напряжения источника значительно облегчает расчет.

Рассмотрим вначале момент возникновения к. з. (рис. 3).

Поскольку речь идет о симметричной трехфазной системе, для оценки явлений достаточно рассматривать процесс в одной фазе.

Как уже упоминалось, при к. з. ток в электрической цепи возрастает. Однако мгновенного увеличения тока (кривая i_t) в обмотке статора генератора произойти не может из-за того, что обмотка статора и цепь к. з. обладают индуктивностью.

В начальный момент к. з. в обмотке статора и в индуктивных сопротивлениях цепи наводится э. д. с. самоиндукции, препятствующая изменению тока, и индуцируется ток самоиндукции встречного направления, так называемый свободный аperiodический ток (кривая i_a). Аperiodическим этот ток называется потому, что направление его не изменяется.

С момента возникновения к. з. ток повреждения можно представить состоящим из двух слагающих: свободно аperiodического тока — аperiodической слагающей тока к. з. и вынужденного периодического тока, создаваемого э. д. с. генератора, — периодической слагающей тока к. з.

В результате взаимного действия слагающих ток в цепи для начального момента к. з. остается равным мгновенному значению тока нагрузочного режима $i_{н,0}$. Таким образом,

$$i_{a,0} + i_{п,0} = i_{н,0}, \quad (1)$$

где $i_{a,0}$ — начальное значение аperiodической слагающей тока к. з.; $i_{п,0}$ — начальное значение периодической слагающей тока к. з., $i_{н,0}$ — мгновенное значение тока нагрузки в момент возникновения к. з.

На основании (1)

$$i_{a,0} = i_{н,0} - i_{п,0}. \quad (2)$$

Из выражения (2) следует, что начальное значение аperiodического тока* будет максимальным при отсутствии тока нагрузки ($i_{н,0}=0$) и возникновении к. з. в тот момент, когда периодическая слагающая имеет наибольшее значение $i_{п,0}=i_{п,m,0}$:

$$i_{a,0,max} = -I_{п,m,0}.$$

Значение периодической слагающей для начального момента к. з. зависит от э. д. с. генератора, его внутреннего сопротивления и сопротивления внешней цепи.

Начальное действующее значение периодической слагающей $i_{п,0}=i_{п,m,0}/\sqrt{2}$ вычисляется по выражениям (49)—(52).

Далее проследим, как изменяются аperiodическая и периодическая слагающие в течение короткого замыкания.

* В сетях с индуктивной нагрузкой.

Апериодическая слагающая затухает по закону показательной функции:

$$i_a = i_{a,0} e^{-\frac{t}{T_a}} = I_{п,м,0} e^{-\frac{t}{T_a}} = I_{п,м,0} \alpha_t,$$

где T_a — постоянная времени затухания; α_t — коэффициент затухания.

Постоянная времени

$$T_a = \frac{L}{r} = \frac{x}{\omega r} = \frac{x}{314r}, \quad (3)$$

где $\omega = 2\pi f$ — угловая частота; r , L и x — соответственно активное сопротивление, индуктивность и индуктивное сопротивление цепи к. з.

Быстрота затухания апериодической слагающей зависит от соотношения между активным и индуктивным сопротивлениями цепи к. з.: чем больше активное сопротивление цепи, тем затухание происходит интенсивнее.

Сказанное выше относительно начальных значений тока к. з. и затухания апериодической слагающей действительно для всех трех случаев к. з., приведенных на рис. 3.

Однако периодическая слагающая тока к. з. изменяется по-разному в зависимости от источника питания. Для генератора без АРВ, как видно, из рис. 3, а с исчезновением апериодической слагающей неустановившийся процесс не заканчивается, так как изменение периодической слагающей тока к. з. происходит более длительно.

При этом амплитуды периодической слагающей уменьшаются от максимального начального $I_{п,м,0}$ до некоторого установившегося значения $I_{п,м,\infty} = \sqrt{2}I_{\infty}$.

Благодаря магнитной связи между обмотками статора и ротора синхронной машины при возрастании периодического тока статора в момент возникновения к. з. в обмотке ротора наводится апериодический индукционный ток, по направлению совпадающий с током обмотки возбуждения (рис. 4); в результате в начальный момент к. з. результирующий магнитный поток обмотки возбуждения и э. д. с. E_q'' (или E_q') машины остаются без изменения (см. приложение).

Далее, с затуханием апериодического тока в обмотке возбуждения результирующий магнитный поток, постепенно уменьшаясь, доходит до установившегося значе-

ния; одновременно уменьшаются э. д. с. и амплитуды периодической слагающей тока к. з.

При достижении периодической слагающей тока к. з. установившегося значения I_{∞} неустановившийся процесс заканчивается. Длительность его определяется затуханием апериодического тока в обмотке возбуждения и при к. з. на выводах генератора составляет примерно 3—5 с.

При пересечении ротором генератора магнитного поля апериодической слагающей тока статора в обмотке

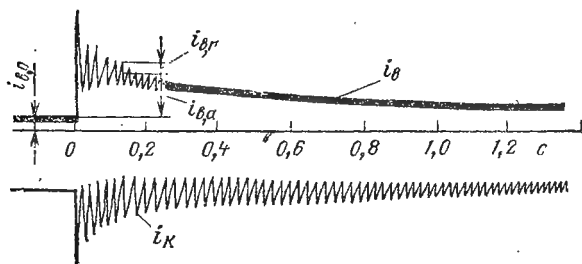


Рис. 4. Осциллограммы токов статора и ротора при внезапном коротком замыкании синхронного генератора.

$i_{\theta, 0}$ — ток возбуждения в нормальном режиме; i_{θ} — полный ток возбуждения; $i_{\theta, \alpha}$ — апериодический ток возбуждения; $i_{\theta, \beta}$ — периодический ток возбуждения; i_K — ток к. з. в обмотке статора.

возбуждения возникает периодический ток. Этот ток складывается с постоянными слагающими тока возбуждения — основной, создаваемой возбудителем, и апериодической — и затухает одновременно с апериодическим током статора (рис. 4).

Отличие процесса к. з. для генераторов с АРВ (рис. 3, б) от рассмотренного случая (рис. 3, а) состоит в том, что снижение напряжения на выводах генератора при к. з. вызывает действие АРВ, увеличивающего ток возбуждения.

Однако вследствие инерционности действие АРВ практически становится заметным лишь через 0,08—0,3 с. Этим объясняется спад периодического тока по значению в первые периоды после возникновения к. з., подобный изменению периодической слагающей для генератора без АРВ. Повышение возбуждения приводит к возрастанию э. д. с. генератора и росту периодической

слагающей тока статора вплоть до установившегося значения.

Длительность неустановившегося процесса в данном случае определяется временем изменения периодической слагающей тока статора от начального значения $I_{\pi, m, 0}$ до установившегося $I_{\pi, m, \infty} = \sqrt{2} I_{\infty}$.

На рис. 3, в показано протекание процесса к. з. в сети, питаемой от энергосистемы.

Из предыдущего известно, что при к. з. в сети напряжение на шинах энергосистемы большой мощности не изменяется. Поскольку внутреннее сопротивление такого источника равно нулю, то напряжение энергосистемы приравнивается ее э. д. с. Неизменность напряжения (э. д. с.) определяет постоянство амплитуд вынужденной периодической слагающей тока к. з. в течение всего процесса к. з. Периодический ток при питании от системы определяется по выражениям (51) и (52).

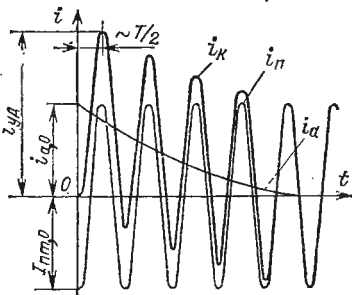


Рис. 5. Графическое определение ударного тока к. з.

Установившийся процесс к. з. при питании от мощного энергетического источника определяется лишь наличием аperiodического тока в обмотке статора. С затуханием этого тока наступает установившийся режим.

Ударный ток трехфазного короткого замыкания. Для выбора аппаратуры высокого напряжения по условию электродинамической стойкости необходимо знать максимальное значение тока к. з.

Возможное наибольшее значение тока к. з. зависит как от предшествующего режима, так и от момента возникновения к. з.

Для сети с преобладающим индуктивным сопротивлением $\varphi_k \approx 90^\circ$ наиболее тяжелым случаем к. з. следует считать его возникновение на холостом ходу, в момент перехода напряжения через нуль (рис. 5).

Очевидно, что слагающие тока к. з. при этом будут иметь наибольшее начальное значение:

$$i_{\pi, 0} = I_{\pi, m, 0}; \quad i_{a, 0} = -I_{\pi, m, 0}.$$

В сумме эти токи составят полный ток к. з., который в начальный момент к. з. будет равен нулю, т. е. току предшествующего режима. Примерно через полпериода ток к. з. достигнет максимального значения. Наибольшее возможное мгновенное значение тока к. з. принято называть ударным током $i_{уд}$ (рис. 5).

В общем случае для начального периода к. з. $t \approx T/2$ с некоторым приближением можно считать, что периодическая слагающая не затухает, как и показано на рис. 5.

При отсутствии затухания аperiodической слагающей ударный ток был бы равен:

$$i_{уд} = i_{п} + i_a = 2I_{п,м,0}.$$

С учетом затухания

$$i_{уд} = I_{п,м,0} + I_{п,м,0} e^{-\frac{t}{T_a}} = I_{п,м,0} \left(1 + e^{-\frac{t}{T_a}} \right) = \sqrt{2} I_{п,0} k_{уд}, \quad (4)$$

где $I_{п,м,0} = \sqrt{2} I_{п,0}$, $k_{уд}$ — ударный коэффициент.

3. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Прохождение токов в проводниках приводит к возникновению между ними электродинамических (механических) усилий. Одинаковое направление токов в параллельных проводниках вызывает их притягивание, противоположное — отталкивание. При этом механические силы взаимодействия, незначительные в режиме нормальной нагрузки, во время к. з. могут достигнуть значений, опасных для аппаратуры и ошиновки, и вызвать их деформацию или разрушение.

Из электротехники известно, что сила взаимодействия (Н) между двумя проводниками при прохождении по ним токов i_1 и i_2 определяется по формуле

$$F = 2 \frac{i_1 i_2 l}{a} k_{\Phi} \cdot 10^{-7},$$

где i_1 и i_2 — мгновенные значения токов в данных проводниках, А; l — длина проводников, м; k_{Φ} — коэффициент формы, учитывающий форму сечения и взаимное расположение проводников; a — расстояние между параллельными проводниками, м.

Максимальное механическое усилие (Н) при двухфазном к. з., при котором токи в поврежденных фазах равны по значению (см. § 12); определяется как

$$F^{(2)} = 2 \frac{i_{уд}^{(2)2} l}{a} k_{\Phi} \cdot 10^{-7},$$

где $i_{уд}^{(2)}$ — ударный ток двухфазного к. з. (наибольшее амплитудное значение).

Для трехфазного к. з. в формулу вводится снижающий коэффициент примерно 0,87, учитывающий неодинаковость мгновенных значений токов в фазах, в результате чего

$$F^{(3)} = \sqrt{3} \frac{i_{уд}^{(3)2} l}{a} k_{\Phi} \cdot 10^{-7}. \quad (5)$$

Расчеты по проверке электродинамической стойкости оборудования при к. з. должны производиться в соответствии с [4].

Примеры расчетов приведены в § 13.

Вследствие того, что максимальные усилия при к. з. возникают практически мгновенно, обеспечить механическую прочность установленного оборудования можно только путем уменьшения тока к. з. — установкой реакторов, трансформаторов с расщепленными обмотками, секционированием шин и т. п.

4. ТЕРМИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

По закону Джоуля-Ленца количество тепла Q , выделяемое электрическим током в проводнике, пропорционально квадрату силы тока I^2 , сопротивлению проводника r и времени t .

Время прохождения тока к. з. определяется действием защитных устройств и отключающей аппаратуры. Для того чтобы повреждения от термического (теплового) воздействия тока к. з. были наименьшими, стремятся отключать к. з. возможно быстрее, так что обычно длительность к. з. находится в пределах от долей секунды до нескольких секунд.

Поскольку ток к. з. может во много раз превышать нормальный ток нагрузки, очевидно, что, несмотря на сравнительно небольшую длительность процесса, при

к. з. возможен значительный перегрев проводника. Перегрев сверх допустимой температуры может вызвать повреждение изоляции — выгорание, потерю эластичности, электрической прочности; быстрый нагрев до определенной температуры с последующим медленным охлаждением может привести к отжигу металла, т. е. к потере механических качеств проводника.

При нагреве проводника током нагрузки часть выделенного тепла рассеивается в окружающую среду, причем степень рассеивания зависит от условий охлаждения. Установившийся перегрев проводника по отношению к температуре окружающей среды определяется из теплового баланса или равенства количества выделенного и рассеянного тепла. Напротив, кратковременность к. з. в большинстве случаев позволяет не считаться с отводом тепла в окружающую среду и принимать, что все выделяемое тепло идет на нагрев и повышение температуры проводника.

Тепловые потери при к. з., теплоотдача или тепловой спад учитываются только при проверке сечений проводников, если время отключения к. з. превышает заданное критическое время или относительно велико активное сопротивление цепи к. з.

Термическое действие тока к. з., исходя из закона Джоуля-Ленца, определяется значением импульса квадратичного тока B_k от протекания тока к. з. i_k за время t_k — с момента возникновения повреждения до его отключения (или прекращения тока в результате его затухания).

В общем виде выражение для определения импульса квадратичного тока имеет вид:

$$B_k = \sum_{t=0}^{t_k} i_k^2 \Delta t, \quad (6)$$

где i_k — ток к. з. (мгновенное значение); Δt — приращение времени; t_k — продолжительность к. з.

Решение задачи по определению нагрева проводника при к. з. осложняется тем, что значение тока i_k за время к. з. изменяется (см. рис. 3). Точный подсчет B_k при изменяющемся значении тока i_k , состоящего из периодической и аperiodической слагающих, достаточно сложен и требует применения методов высшей математики.

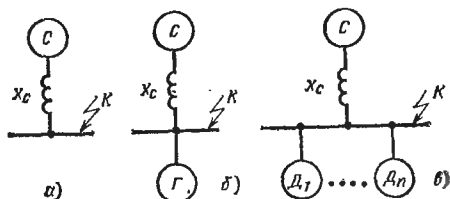
В связи с этим для вычисления B_K целесообразно использовать формулы (7) — (14) из [4].

В [4] рассматриваются три схемы определения импульсов квадратичного тока (рис. 6, а, б и в). Там же принято, что импульс B_K состоит из двух слагаемых или двух импульсов — от периодического тока $B_{K,п}$ и от аperiodического $B_{K,а}$:

$$B_K = B_{K,п} + B_{K,а}. \quad (7)$$

Рис. 6. Типовые схемы для расчета импульсов квадратичного тока от токов к. з.

а — система; б — генератор — система; в — группа двигателей — система.



а) Для схемы питания потребителей от энергосистемы импульсы квадратичного тока вычисляются по следующим выражениям:

$$B_{K,п} = I_{п,с}^2 t_{отк}; \quad (8)$$

$$B_{K,а} = I_{п,с}^2 T_{а,с} \left(1 - e^{-\frac{2t_{отк}}{T_{а,с}}} \right) \approx I_{п,с}^2 T_{а,с}^*, \quad (9)$$

где $I_{п,с}$ — действующее значение периодической составляющей тока к. з. системы; $t_{отк}$ — время отключения к. з.; $T_{а,с}$ — постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока к. з. энергосистемы,

$$T_{а,с} = x_{\Sigma} / \omega r_{\Sigma},$$

где x_{Σ} и r_{Σ} — соответственно результирующие индуктивное и активное сопротивления энергосистемы; $\omega = 2\pi f = 314$ — угловая частота.

Результирующий импульс квадратичного тока определяется по (7) — (9).

б) Для двухлучевой схемы питания потребителей от энергосистемы и генератора вначале по кривым рис. 7 для расчетного времени отключения генератора определяют относительные значения импульсов токового и

* Упрощенное выражение можно использовать, если $t_{отк}/T_{а,с} = 1 \div 2$.

квадратичного тока от периодической слагающей тока к. з. генератора.

По полученным результатам рассчитывается импульс квадратичного тока от периодической слагающей тока к. з.

$$B_{к,п} = (I_{п,с}^2 + I_{п,0,г}^2 B_* + 2I_{п,с} I_{п,0,г} \tau_*) t_{отк}, \quad (10)$$

где $I_{п,с}$ — действующее значение периодического тока к. з. энергосистемы; $I_{п,0,г}$ — начальное действующее значение периодической слагающей тока к. з. генератора; $t_{отк}$ — время отключения к. з.

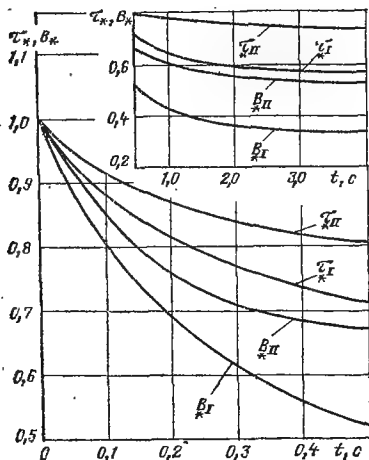


Рис. 7. Расчетные кривые относительных токовых импульсов (τ_*) и импульсов квадратичного тока (B_*).

I — турбогенераторы (кроме ТВВ-800) и синхронный компенсатор КСВ-100; II — гидрогенераторы, синхронные компенсаторы (кроме КСВ-100) и турбогенератор ТВВ-800.

Примечание. При проверке термической стойкости проводников и аппаратов, установленных в цепи генератора

$$B_{к,п} = B_* I_{п,0,г}^2 t_{отк,г},$$

где $t_{отк,г}$ — время отключения к. з. в цепи генератора.

Импульс квадратичного тока от апериодической слагающей определяется с учетом разновременности затухания апериодических токов от энергосистемы и генератора

$$B_{к,а} = I_{п,с}^2 T_{а,с} + I_{п,0,г}^2 T_{а,г} + \frac{4I_{п,с} I_{п,0,г}}{\frac{1}{T_{а,с}} + \frac{1}{T_{а,г}}}, \quad (11)$$

где $T_{а,г}$ — постоянная времени затухания апериодической слагающей тока к. з. от генератора (берется по каталогу).

Суммарный импульс $B_{к}$ определяется по (7), (10) и (11).

в) Для схемы работы на сборные шины энергосистемы и электродвигателей все двигатели заменяются одним с усредненными параметрами.

Затухание периодического тока к. з. от такого эквивалентного двигателя учитывается приближенно с некоторой постоянной времени T'_d :

$$B_{к,п} = I_{п,с}^2 t_{отк} + 2I_{п,с} I_{п,0,д} T'_d \left(1 - e^{-\frac{2t_{отк}}{T'_d}} \right) + 0,5I_{п,0,д}^2 T'_d \left(1 - e^{-\frac{2t_{отк}}{T'_d}} \right), \quad (12)$$

где $I_{п,0,д}$ — начальное действующее значение периодической слагающей тока к. з. от эквивалентного электродвигателя; T'_d — время затухания периодической слагающей тока к. з. электродвигателей.

Импульс квадратичного тока от аperiodической слагающей определяется из выражения

$$B_{к,а} = (I_{п,с} + I_{п,0,д})^2 T_{а,сх} \left(1 - e^{-\frac{2t_{отк}}{T_{а,сх}}} \right). \quad (13)$$

В этой формуле постоянные времени затухания аperiodических токов от системы и электродвигателей заменены обобщенной постоянной времени

$$T_{а,сх} = \frac{T_{а,с} I_{п,с} + T_{а,д} I_{п,0,д}}{I_{п,с} + I_{п,0,д}}, \quad (14)$$

где $T_{а,с}$ — постоянная времени затухания аperiodического тока к. з. системы; $T_{а,д}$ — то же для электродвигателей.

Результирующий импульс определяется по (7), (12) и (13).

Выше даны выражения для расчета B_k в случае преобладания в группе электродвигателей синхронных машин; если же электродвигатели в основном асинхронные, то

$$B_k = I_{п,с}^2 (t_{отк} + T_{а,сх}) + I_{п,0,д}^2 (0,5 T'_d + T_{а,сх}) + 2I_{п,с} I_{п,0,д} (T'_d + T_{а,сх}).$$

Примеры практической проверки оборудования на термическую стойкость по выражениям (7) — (14) приведены в § 13.

В основном все практические задачи, связанные с термическим действием тока к. з., сводятся к обеспечению термической стойкости оборудования. Для достижения этой цели прибегают в случае необходимости к ограничению значения тока к. з. путем реактирования, секционирования или к уменьшению длительности существования к. з. Иногда оба эти способа ограничения нагрева от тока к. з. применяют одновременно.

5. ВЫБОР ИСХОДНЫХ УСЛОВИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Принятые допущения. В расчетах токов к. з., приведенных ниже, приняты следующие допущения:

не учитываются токи нагрузки;

не учитываются емкости, а следовательно, и емкостные токи в воздушной и кабельной сети;

трехфазная сеть принимается симметричной, или сопротивления фаз — точно равными друг другу;

отсутствует насыщение стали электрических машин (генераторов, электродвигателей, трансформаторов);

не учитываются токи намагничивания трансформаторов;

не учитываются активные сопротивления генераторов, трансформаторов и реакторов, за исключением случаев, когда требуется определять постоянные времени затухания свободных токов;

не учитывается сдвиг по фазе э. д. с. различных источников питания, входящих в расчетную схему.

В соответствии с назначением расчета токов к. з. (для выбора или проверки аппаратуры, вычисления уставок релейной защиты, подбора разрядников для грозозащиты линий электропередачи и подстанций, анализа аварийных отключений и т. п.) определяют исходные условия. Это означает выбор расчетной схемы сети, режимов к. з., вида к. з. местоположения точек к. з. и момента времени к. з.

Расчетная схема сети. На расчетной схеме сети в однолинейном изображении указываются источники питания (энергосистема, генераторы) и элементы сети (линии электропередачи, трансформаторы, реакторы), связывающие источники питания с точками к. з., а также параметры всех упомянутых элементов, необходимые для расчета.

Электродвигатели напряжением выше 1000 В вводятся в расчетную схему в качестве дополнительного генерирующего источника при условии, если они связаны с местом к. з. непосредственно, кабельными линиями, токопроводами или через линейные реакторы.

Режимы к. з. В зависимости от поставленной задачи может потребоваться определение не только максимальных, но и минимальных значений токов в месте к. з. и по элементам расчетной схемы, а также остаточных напряжений в различных точках сети.

Для решения задачи производится исследование расчетной схемы и выясняется, какие элементы расчетной схемы должны быть дополнительно включены или выведены для получения большего или меньшего значения тока к. з., большего или меньшего остаточного напряжения на шинах. Такого рода предварительная работа с расчетной схемой называется выбором расчетных режимов.

Если расчетная схема составлена для нормальных условий работы сети, а в большинстве случаев это бывает так, то исходный режим, при котором рассчитывается к. з., называется нормальным режимом. Все остальные режимы, выбранные для расчета, отличные от нормального, обычно характеризуются другими параметрами энергосистемы (§ 8) или измененным состоянием элементов расчетной схемы. Например, в нормальном режиме генераторы ТЭЦ работают параллельно, в минимальном — раздельно.

Расчетным режимам придаются смысловые названия исходя из значения тока к. з., полученного при расчете нормальный, максимальный, минимальный и т. п. или сообщается цифровая нумерация: I, II, III и т. д.

При перспективных расчетах максимальные режимы к. з. следует определять с учетом перспективного развития сети.

Расчеты должны производиться по режимам, соответствующим прохождению по рассматриваемому участку сети наибольшего или наименьшего тока к. з. Так, например, проверка электротехнического оборудования на термическое и электродинамическое действие токов к. з. должна производиться по наиболее тяжелому режиму, когда по рассматриваемому элементу проходит максимальный ток. Напротив, проверка чувствительности ре-

лейной защиты производится по наименьшему току к. з., соответствующему минимальному режиму.

Не следует искусственно усложнять условия, применяя наложение ремонтных режимов, или ориентироваться на временные схемы, создаваемые при переключениях в сети, испытаниях оборудования и т. п. Например, при выборе расчетного режима для настройки устройств релейной защиты не следует считаться с наложением ремонтных отключений двух питающих элементов (допустим, линии и трансформатора) из трех, если в эксплуатации такие совпадения не допускаются; при выборе расчетного режима для проверки аппаратуры не нужно считаться с кратковременным включением на параллельную работу питающих трансформаторов, если в нормальных условиях это запрещается.

Вид короткого замыкания. Вид к. з. определяется задачей расчета. Так, например, проверка аппаратов на электродинамическую стойкость или механическое действие тока к. з. должна производиться по трехфазному к. з., дающему наибольшее электромеханическое усилие между проводниками в начальный момент к. з.

Стойкость оборудования к термическому (тепловому) действию тока к. з. также проверяется по трехфазному к. з.

В расчетах релейной защиты, смотря по обстоятельствам, могут быть использованы токи трехфазного, двухфазного, двухфазного на землю и однофазного к. з.

Местоположение точек короткого замыкания. При проверке электрооборудования на электродинамическую или термическую стойкость точки к. з. следует располагать таким образом, чтобы при этом проверяемое оборудование находилось в наиболее неблагоприятных условиях.

При выборе уставок релейной защиты точка к. з. принимается, в зависимости от назначения выполняемого расчета, в конце или в начале защищаемого участка.

Момент времени короткого замыкания. Момент в процессе к. з., для которого должны быть определены токи или остаточные напряжения, полностью зависит от характера расчета. Например, для проверки отключающей способности выключателя производится расчет тока к. з. для времени t , равного собственному времени отключения выключателя с добавлением 10 мс; для проверки чувствительности токовой защиты, действующей с вы-

держкой времени, необходимо определить ток для момента к. з., соответствующего выдержке времени защиты. В большинстве случаев для проверки чувствительности релейной защиты допустимо пользоваться значением тока к. з. для начального момента времени, что упрощает расчет. При этом уменьшение тока к. з. с течением времени учитывается соответствующим коэффициентом запаса.

6. СОСТАВЛЕНИЕ И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ

Схема замещения для расчета токов к. з. составляется по расчетной схеме сети. Для этого все без исключения элементы схемы заменяются соответствующими электрическими сопротивлениями, а для источников питания, кроме того, указываются значения э. д. с.

Полное сопротивление линии электропередачи $z = \sqrt{r^2 + x^2}$ записывается на схеме через составляющие r и x следующим образом: вначале пишется r , затем x ; в результате запись приобретает вид: $r; x$.

При составлении схемы удобна запись сопротивлений дробью: в числителе указывается порядковый номер элемента, в знаменателе — значение сопротивления. Элементы с магнитосвязанными цепями — трансформаторы — вводятся в схему своими эквивалентными электрическими сопротивлениями (§ 8). Схему замещения, включающую эквивалентные сопротивления трансформаторов, называют эквивалентной схемой замещения.*

В большинстве случаев схема сети содержит одну или несколько ступеней трансформации.

Для составления эквивалентной схемы замещения выбирается основная, или базовая, ступень трансформации и все электрические величины остальных ступеней приводятся к напряжению основной ступени.

Для приведения используются известные соотношения:

$$\left. \begin{aligned} \vec{E} &= E(n_1 n_2 n_3, \dots, n_n); \\ \vec{U} &= U(n_1 n_2 n_3, \dots, n_n); \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

* Обычно слово «эквивалентная» опускается.

$$\dot{I} = I \left(\frac{1}{n_1 n_2 n_3, \dots, n_n} \right). \quad (16)$$

По закону Ома и на основании (15) и (16) приведенное сопротивление выразится как

$$\left. \begin{aligned} \overset{\circ}{z} &= z (n_1 n_2 n_3, \dots, n_n)^2; \\ \overset{\circ}{x} &= x (n_1 n_2 n_3, \dots, n_n)^2; \\ \overset{\circ}{r} &= r (n_1 n_2 n_3, \dots, n_n)^2. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Во всех указанных соотношениях $n_1, n_2, n_3, \dots, n_n$ — коэффициенты трансформации последовательно включенных трансформаторов, определенные в направлении от основной ступени к ступени, где производится пересчет величин.

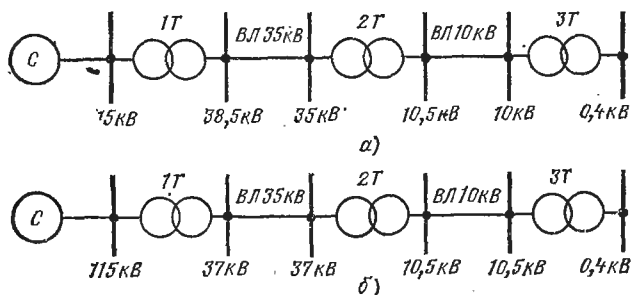


Рис. 8. Схемы к примерам 1 и 2.

Пример 1. Задано сопротивление, Ом, трансформатора 3Т $x_{3T} = x$, подсчитанное для ступени 0,4 кВ (рис. 8, а). За базовую ступень принято напряжение 115 кВ на шинах системы. Определить сопротивление трансформатора 3Т, приведенное к базовой ступени напряжения.

Коэффициенты трансформации трансформаторов 1Т, 2Т, 3Т, соответственно равны:

$$n_1 = \frac{115}{38,5}; \quad n_2 = \frac{35}{10,5}; \quad n_3 = \frac{10}{0,4}.$$

Отсюда на основании (17)

$$\overset{\circ}{x}_{3T} = x \left(\frac{115}{38,5} \right)^2 \cdot \left(\frac{35}{10,5} \right)^2 \cdot \left(\frac{10}{0,4} \right)^2.$$

Для приближенных практических расчетов рекомендуется заменять действительные коэффициенты транс-

формации и номинальные напряжения элементов схемы замещения средними номинальными напряжениями, кВ, по следующей шкале: 515; 340; 230; 154; 115; 37; 24; 20; 18; 15,75; 13,8; 10,5; 6,3; 3,15; 0,69; 0,525; 0,4; 0,23; 0,127, за исключением реакторов с завышенным номинальным напряжением по отношению к номинальному напряжению установки, например реакторов 10 кВ, используемых в установках 6 кВ.

После замены номинальных напряжений средними приведение величин к основной ступени значительно упрощается, и формулы пересчета приобретают вид:

$$\overset{\circ}{E} = E \frac{U_{\text{ср},6}}{U_{\text{ср}}}; \quad (18)$$

$$\overset{\circ}{U} = U \frac{U_{\text{ср},6}}{U_{\text{ср}}};$$

$$\overset{\circ}{I} = I \frac{U_{\text{ср}}}{U_{\text{ср},6}}; \quad (19)$$

$$\overset{\circ}{z} = z \left(\frac{U_{\text{ср},6}}{U_{\text{ср}}} \right)^2;$$

$$\overset{\circ}{x} = x \left(\frac{U_{\text{ср},6}}{U_{\text{ср}}} \right)^2; \quad (20)$$

$$\overset{\circ}{r} = r \left(\frac{U_{\text{ср},6}}{U_{\text{ср}}} \right)^2.$$

При перемножении коэффициентов трансформации в выражениях (15)–(17) напряжения всех промежуточных ступеней сокращаются и остается лишь отношение двух напряжений — основной (базовой) ступени и той ступени, на которой производится пересчет величин.

Пример 2. По заданному сопротивлению, Ом, трансформатора $3T$ $x_{3T} = x$ (рис. 8,б) определить сопротивление трансформатора, приведенное к базовой ступени $U_6 = 115$ кВ.

По выражению (20)

$$\overset{\circ}{x}_{3T} = x \left(\frac{115}{0,4} \right)^2.$$

После того как в эквивалентной схеме замещения э. д. с. и сопротивления приведены к базовой ступени напряжения, схема замещения упрощается или свертывается относительно точки к. з. Упрощение состоит в том, что точки приложения э. д. с. объединяются и э. д. с. схемы

заменяются эквивалентной э. д. с. $E_{\Sigma K}$, сопротивления схемы путем последовательного и параллельного сложения, трансформации из треугольника в звезду и т. п., превращаются в суммарное или результирующее сопротивление Z_{Σ} или x_{Σ} (рис. 9, а).

Иногда объединение цепей полностью не производится и заканчивается на двух-, трех- или многолучевой звезде (рис. 9, б—г).

На основании закона Ома и дополнительных условий, характеризующих тот или иной вид к. з., по результирующей

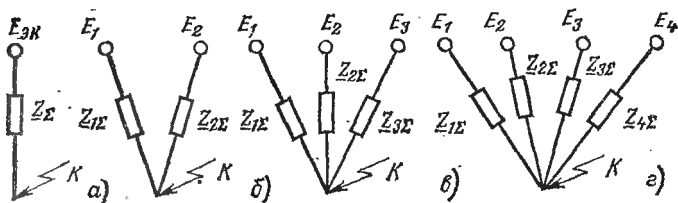


Рис. 9. Упрощение схемы замещения до одной (а) или нескольких результирующих ветвей (б—г).

щим э. д. с. и сопротивлению определяется суммарный ток в точке к. з.

Если при разных э. д. с. в ветвях помимо суммарного тока к. з. требуется определить токораспределение по ветвям, следует использовать для расчета тока к. з. принцип наложения (см. далее), модификацию принципа наложения с применением собственных и взаимных сопротивлений [1] или другие способы расчета тока к. з. с неодинаковыми э. д. с.

Для получения токораспределения по ветвям при равных э. д. с. схему (рис. 9, а) необходимо развернуть полностью или частично в обратном направлении.

Полученные токи имеют истинные значения только для основной ступени трансформации. Для других ступеней их следует пересчитывать в соответствии с выражением (19).

Если э. д. с. источников не равны, эквивалентная э. д. с. для двух ветвей схемы определяется по формуле

$$E_{\Sigma K} = \frac{E_1 y_1 + E_2 y_2}{y_1 + y_2}, \quad (21)$$

где $y_1 = 1/x_1$ и $y_2 = 1/x_2$.

В частном случае, когда $E_1 = E_2$, вычисления э. д. с. $E_{\text{эк}}$ не требуется; очевидно, что $E_{\text{эк}} = E_1 = E_2$.

Сложение сопротивлений (рис. 10) выполняется в соответствии с выражениями:

при последовательном соединении элементов схемы замещения

$$x_{\text{эк}} = x_1 + x_2 + x_3; \quad (22)$$

при параллельном соединении элементов

$$x_{\text{эк}} = \frac{1}{\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} + \frac{1}{x_3}}. \quad (23)$$

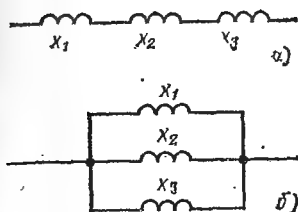


Рис. 10. Сложение сопротивлений.

а — соединенных последовательно;
б — параллельно.

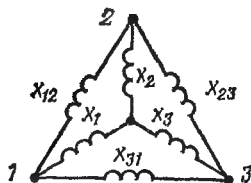


Рис. 11. Преобразование треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду и, наоборот, звезды сопротивлений в эквивалентный треугольник.

Если элементы схемы замещения составляют треугольник (рис. 11), к вершинам которого подключены источники питания, то для упрощения схемы замещения и определения токов от каждого источника в отдельности производится преобразование схемы из треугольника в звезду.

Сопротивления эквивалентной звезды определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{x_{12} x_{31}}{x_{12} + x_{23} + x_{31}}; \\ x_2 &= \frac{x_{23} x_{12}}{x_{12} + x_{23} + x_{31}}; \\ x_3 &= \frac{x_{31} x_{23}}{x_{12} + x_{23} + x_{31}}. \end{aligned} \quad (24)$$

Преобразование из звезды в эквивалентный треугольник (рис. 11) находит применение при вычислениях тока по расчетным кривым, аналитических расчетах несимметричных к. з. и производится в соответствии с выражениями:

$$\begin{aligned}x_{12} &= x_1 + x_2 + \frac{x_1 x_2}{x_3}; \\x_{23} &= x_2 + x_3 + \frac{x_2 x_3}{x_1}; \\x_{31} &= x_3 + x_1 + \frac{x_3 x_1}{x_2}.\end{aligned}\quad (25)$$

В преобразованиях схем, о которых говорилось выше, генерирующие ветви не затрагиваются. Однако возможны преобразования с использованием генерирующих ветвей, как например: звезда в схеме замещения заменяется эквивалентным треугольником, треугольник разрезается по вершине, в которой приложена э. д. с., и эта э. д. с. сохраняется на концах полученных ветвей (см. [4]).

Рис. 12. Схема к расчету токов к. з. с помощью коэффициентов распределения.

x_1, x_2 с общим сопротивлением x_3 до точки к. з. и с двумя объединенными источниками питания. Токи от каждого источника вычисляют с помощью коэффициентов распределения (рис. 12). Коэффициент распределения показывает, какая доля тока к. з., принятого за единицу, создается источником питания данной ветви при условии, что э. д. с. источников равны.

Очевидно, что в сумме коэффициенты распределения равны единице. Для двух ветвей $C_1 + C_2 = 1$.

Определение коэффициентов C_1 и C_2 производится по закону Кирхгофа из соотношений сопротивлений:

$$C_1 = \frac{x}{x_1} \quad \text{и} \quad C_2 = \frac{x}{x_2}$$

или

$$C_1 = \frac{x_2}{x_1 + x_2} \text{ и } C_2 = \frac{x_1}{x_1 + x_2},$$

где $x = \frac{x_1 x_2}{x_1 + x_2}$ — суммарное сопротивление схемы до точки объединения лучей.

Для определения токов по ветвям находят эквивалентные сопротивления, непосредственно связывающие источники питания с точкой к. з., или взаимные сопротивления между генераторами и точкой к. з.:

$$x_{\text{БК1}} = \frac{x_{\Sigma}}{C_1} \text{ и } x_{\text{БК2}} = \frac{x_{\Sigma}}{C_2}, \quad (26)$$

$$\text{где } x_{\Sigma} = \frac{x_1 x_2}{x_1 + x_2} + x_3.$$

Подставляя в (26) значения x_{Σ} , C_1 и C_2 , получим:

$$x_{\text{БК1}} = x_3 + x_1 + \frac{x_3 x_1}{x_2};$$

$$x_{\text{БК2}} = x_3 + x_2 + \frac{x_2 x_3}{x_1}.$$

Нетрудно заметить, что сопротивления $x_{\text{БК}}$ соответствуют сторонам эквивалентного треугольника (25).

Для нахождения токов в ветвях схемы замещения при источниках питания с неравными э. д. с. может быть использован принцип наложения. Суть этого принципа состоит в том, что действительный режим представляется как результат наложения двух или нескольких условных режимов, каждый из которых характеризуется наличием одной э. д. с. при всех остальных, равных нулю.

Рассмотрим применение принципа наложения для наиболее часто встречающегося в практике случая с двумя источниками питания и общим сопротивлением в месте к. з. (рис. 13, а):

для наглядности схема замещения изображается в виде двух контуров с генераторами $G1$ и $G2$ (рис. 13, б);

задается положительное направление обхода контура по часовой стрелке или против для правильного суммирования токов в контурах;

поочередно приравниваются нулю э. д. с. генератора $G2$ и генератора $G1$ рис. 13, в, г и определяются токи в контурах от каждого генератора;

искомые токи к. з. находятся суммированием токов от генераторов Г1 и Г2 в схемах рис. 13, в, г условных режимов:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_{1,Г1} + (-I_{2,Г2}); \\ I_2 &= I_{1,Г2} + (-I_{2,Г1}); \\ I_3 &= I_{3,Г1} + I_{3,Г2}. \end{aligned} \quad (27)$$

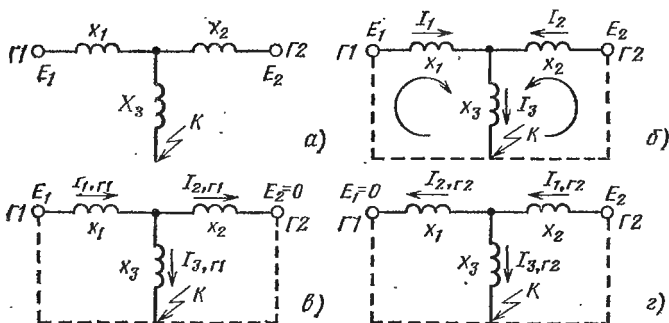


Рис. 13. Схема к расчету токов к. з. методом наложения.
 а — схема замещения; б — результирующая схема; в, г — схемы условных режимов.

7. ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ЕДИНИЦ ДЛЯ РАСЧЕТА ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Расчет токов к. з. может производиться в абсолютных (именованных) или относительных единицах.

Выражение значений в относительных единицах, процентах или долях номинальной или принятой базовой величины знакомо из курсов физики и электрических машин. Также известно, что сопротивления электрических машин и трансформаторов в паспортах и каталогах задаются в относительных единицах.

При расчете в относительных единицах все величины сравниваются с основными или базовыми.

Относительное выражение величин удобно для оценки влияния того или иного участка схемы или отдельного элемента на результат расчета. По способу относи-

тельных единиц просто определяется ток к. з. на выводах генератора или максимально возможный ток к. з. за трансформатором (§ 9), если известны их номинальные параметры.

Для расчета в относительных единицах сначала выбирают базовые величины или условия: мощность S_6 , напряжение U_6 , ток I_6 и сопротивление x_6 или z_6 .

Обычно задаются двумя величинами — базовыми мощностью и напряжением, остальные две — ток и сопротивление — получают из уравнений мощности и закона Ома:

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} U_6};$$

$$z_6 = \frac{U_6}{\sqrt{3} I_6},$$

или

$$x_6 = \frac{U_6}{\sqrt{3} I_6}^*.$$

За базовое напряжение обычно принимается номинальное $U_{ном}$ или среднее расчетное $U_{ср}$ напряжение какой-либо ступени трансформации.

При выборе базовой мощности руководствуются тем, чтобы порядок относительных значений, полученных при расчете, был удобен. Чаще всего базовую мощность принимают равной 100 МВ·А или 1000 МВ·А, но иногда останавливаются на номинальной мощности какого-либо элемента, если она несколько раз повторяется в схеме.

Относительные величины выражаются следующим образом:

$$\begin{aligned} E_{*(6)} &= \frac{E}{U_6}; \\ U_{*(6)} &= \frac{U}{U_6}; \end{aligned} \quad (28)$$

$$I_{*(6)} = \frac{I}{I_6}; \quad (29)$$

* Для чисто индуктивных цепей.

$$z_{*(6)} = \frac{z}{z_6}; \quad x_{*(6)} = \frac{x}{z_6}; \quad r_{*(6)} = \frac{r}{z_6}; \quad (30)$$

или

$$x_{*(6)} = \frac{x}{x_6}.$$

Индекс * (звездочка) указывает на то, что речь идет об относительной величине, индекс «б» говорит о том, что она приведена к базовым условиям.

Базовое сопротивление z_6 или x_6 , как правило, непосредственно в формулу пересчета (30) не вводится, а выражается через напряжение и ток или мощность:

$$\begin{aligned} z_{*(6)} &= z \frac{\sqrt{3} I_6}{U_6} = z \frac{S_6}{U_6^2}; \\ x_{*(6)} &= x \frac{\sqrt{3} I_6}{U_6} = x \frac{S_6}{U_6^2}; \\ r_{*(6)} &= r \frac{\sqrt{3} I_6}{U_6} = r \frac{S_6}{U_6^2}. \end{aligned} \quad (31)$$

Относительное базовое сопротивление показывает, какая часть базового напряжения, приложенного к цепи, падает в рассматриваемом сопротивлении при прохождении по нему базового тока.

Относительные величины можно выражать как в долях принятой базовой величины, так и в процентах. Например, $x \% = 100 x_{*}$.

Для расчета токов к. з. в относительных единицах все сопротивления и э. д. с. эквивалентной схемы замещения приводят к базовым условиям. Для основной базовой ступени это приведение производится по (28), (29) и (31).

Для остальных ступеней трансформации устанавливаются свои базовые условия путем пересчета базовых величин основной ступени трансформации; не пересчитывается только базовая мощность — она остается неизменной на всех ступенях:

$$\dot{U}_6 = U_6 \left(\frac{1}{n_1 n_2 n_3 \dots n_n} \right); \quad (32)$$

или

$$\overset{\circ}{I}_6 = I_6 (n_1 n_2 n_3, \dots, n_n), \quad (33)$$

$$\overset{\circ}{I}_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \overset{\circ}{U}_6},$$

где $n_1, n_2, n_3, \dots, n_n$ — коэффициенты трансформации последовательно включенных трансформаторов, определенные в направлении от базовой ступени к той ступени, на которой производится приведение величин к базовым условиям.

С учетом (32) и (33) относительные величины на всех ступенях трансформации, кроме базовой, определяются по выражениям:

$$E_{*(6)} = \frac{E}{\overset{\circ}{U}_6}; \quad (34)$$

$$U_{*(6)} = \frac{U}{\overset{\circ}{U}_6};$$

$$I_{*(6)} = \frac{I}{\overset{\circ}{I}_6}; \quad (35)$$

$$z_{*(6)} = z \frac{S_6}{\overset{\circ}{U}_6^2};$$

$$x_{*(6)} = x \frac{S_6}{\overset{\circ}{U}_6^2}; \quad (36)$$

$$r_{*(6)} = r \frac{S_6}{\overset{\circ}{U}_6^2}.$$

Не будет ошибкой, если напряжение, ток и сопротивление любой ступени трансформации привести к основной ступени, а затем отнести к базовым условиям, выбранным для этой ступени, т. е.:

$$E_{*(6)} = \frac{\overset{\circ}{E}}{\overset{\circ}{U}_6}; \quad (37)$$

$$U_{*(6)} = \frac{\overset{\circ}{U}}{\overset{\circ}{U}_6};$$

$$I_{*(6)} = \frac{\overset{\circ}{I}}{I_6}; \quad (38)$$

$$z_{*(6)} = z \frac{\overset{\circ}{S_6}}{U_6^2};$$

$$x_{*(6)} = x \frac{\overset{\circ}{S_6}}{U_6^2}; \quad (39)$$

$$r_{*(6)} = r \frac{\overset{\circ}{S_6}}{U_6^2}.$$

Если расчетные параметры элементов схемы заданы в относительных номинальных единицах, то для перевода их в базовые пользуются следующими соотношениями:

$$x_{*(6)} = x_{*(\text{ном})} \frac{\overset{\circ}{I_6} U_{\text{ном}}}{I_{\text{ном}} \overset{\circ}{U_6}}, \quad (40)$$

иначе,

$$x_{*(6)} = x_{*(\text{ном})} \frac{S_6 \overset{\circ}{U_{\text{ном}}}^2}{S_{\text{ном}} \overset{\circ}{U_6}^2}. \quad (41)$$

Выражениями (40) и (41) можно пользоваться для пересчета величин как на основной, так и на всех других ступенях трансформации, только очевидно, что для основной ступени не требуется производить приведение базовых величин.

Если номинальное напряжение аппарата $U_{\text{ном}}$ равно или приравнено к среднему напряжению $U_{\text{ср}}$ ступени, на которой он установлен, и напряжение $\overset{\circ}{U_6}$ определяется по средним напряжениям ступеней, выражения (40) и (41) упрощаются и в результате приобретают вид:

$$x_{*(6)} = x_{*(\text{ном})} \frac{\overset{\circ}{I_6}}{I_{\text{ном}}} \quad (42)$$

или

$$x_{*(6)} = x_{*(\text{ном})} \frac{S_6}{S_{\text{ном}}}. \quad (43)$$

Если расчет производится в именованных единицах, а параметры схемы заданы в относительных номинальных единицах, то необходимо произвести пересчет, кото-

Таблица 1. Пересчет U , I и x в относительные базовые величины

Характер пересчета	Величины, подлежащие приведению	Расчетные выражения	
		Основная ступень трансформации	Прочие ступени трансформации
Из именованных в относительные базовые величины	U	$\frac{U}{U_6}$	$\frac{U}{U_6^\circ}$ или $\frac{\overset{\circ}{U}}{U_6}$
	I	$\frac{I}{I_6}$	$\frac{I}{I_6^\circ}$ или $\frac{\overset{\circ}{I}}{I_6}$
	x	$x \frac{S_6}{U_6^2}$	$x \frac{S_6}{U_6^2}$ или $x \frac{\overset{\circ}{S_6}}{U_6^2}$
Из относительных номинальных в относительные базовые величины	x	$x_{*(\text{НОМ})} \frac{I_6 U_{\text{НОМ}}}{I_{\text{НОМ}} U_6}$	$x_{*(\text{НОМ})} \frac{\overset{\circ}{I_6} U_{\text{НОМ}}}{I_{\text{НОМ}} \overset{\circ}{U_6}}$
		$x_{*(\text{НОМ})} \frac{I_6}{I_{\text{НОМ}}}$	$x_{*(\text{НОМ})} \frac{\overset{\circ}{I_6}}{I_{\text{НОМ}}}$
		$x_{*(\text{НОМ})} \frac{S_6 U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}} U_6^2}$	$x_{*(\text{НОМ})} \frac{S_6 U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}} \overset{\circ}{U_6}^2}$
		$x_{*(\text{НОМ})} \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}}$	$x_{*(\text{НОМ})} \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}}$

рый для сопротивлений производится на основании (31) с заменой базовых величин номинальными:

$$x = x_{*(\text{НОМ})} \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} I_{\text{НОМ}}} = x_{*(\text{НОМ})} \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}}; \quad (44)$$

$$r = r_{*(\text{НОМ})} \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} I_{\text{НОМ}}} = r_{*(\text{НОМ})} \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}}.$$

Для наглядности наиболее употребительные соотношения величин сведены в табл. 1.

8. ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕМЕНТОВ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ

Синхронные генераторы. Для расчета должны быть известны: номинальная мощность $S_{\text{ном}}$; номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$; сверхпереходное индуктивное сопротивление x_d'' ; сверхпереходная э. д. с. E'' ; постоянная времени затухания апериодической составляющей тока трехфазного к. з. $T_a^{(3)}$.

Перечисленные параметры, кроме э. д. с., даются в паспортных данных машины, а в случае отсутствия могут быть взяты из справочных таблиц.

Электродвижущая сила E'' (фазная величина) определяется выражением

$$E'' \approx U_{\text{ном}} + I_{\text{ном}} x_d'' \sin \varphi^*, \quad (45)$$

где $U_{\text{ном}}$ — номинальное фазное напряжение; $I_{\text{ном}}$ — номинальный ток; φ — угол между током и напряжением в доаварийном режиме.

Приближенно E'' можно подсчитать по номинальному напряжению $U_{\text{ном}}$:

$$E'' \approx k U_{\text{ном}}.$$

Значения коэффициента k , равного э. д. с. E'' в относительных единицах, приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Средние значения x_d'' и E'' , отн. ед., при номинальных условиях по [1]

Тип машины	x_d''	E''
Турбогенератор мощностью: до 100 МВт	0,125	1,08
100—500 МВт	0,2	1,13
Гидрогенератор с демпферными обмотками	0,2	1,13
Гидрогенератор без демпферных обмоток	0,27	1,18
Синхронный компенсатор	0,2	1,2
Синхронный двигатель	0,2	1,1
Асинхронный двигатель	0,2	0,9
Обобщенная нагрузка	0,35	0,85

* См. приложение (П4). Индекс q при э. д. с. в (45) опущен, так как выражение (П4), данное как приближенное для E_q , соответствует полной расчетной э. д. с. E'' , точнее ее проекции на напряжение U .

Эквивалентные источники питания. Если имеется источник питания, заданный суммарной мощностью генераторов того или иного типа S_{Σ} и результирующим сопротивлением для начального момента времени x_c , то такой источник может рассматриваться как эквивалентный генератор с номинальной мощностью $S_{\text{ном}, \Sigma}$ и сверхпереходным сопротивлением x_c .

Если источником питания является мощное энергетическое объединение, заданное результирующим сопротивлением x_c , током к. з. I_k или мощностью $S_k = \sqrt{3} U_{\text{ср}} I_k$, то можно считать, что такое объединение является энергосистемой, удаленной от шин потребителя на сопротивление x_c .

Когда необходимые данные об энергосистеме отсутствуют, расчеты производят по предельному току отключения $I_{\text{отк}}$ выключателей, установленных на шинах связи с энергосистемой. Ток отключения приравнивается току к. з. I_k и отсюда определяется сопротивление x_c .

Электродвигатели напряжением выше 1000 В: рассматриваются аналогично генераторам. Сверхпереходная э. д. с. E'' определяется как $E'' \approx k U_{\text{ном}}$. Коэффициент k соответствует E'' и берется по табл. 2.

Сверхпереходное сопротивление x''_{d*} в паспорте двигателя в отличие от генераторов не указывается и определяется по кратности его пускового тока:

$$x''_{d*} = \frac{I_{\text{ном}}}{k_{\text{п}} I_{\text{ном}}} = \frac{1}{k_{\text{п}}},$$

где $I_{\text{ном}}$ — номинальный ток двигателя; $k_{\text{п}}$ — кратность пускового тока к номинальному.

Обобщенная нагрузка. Обобщенной нагрузкой принято называть смешанную нагрузку, состоящую из нагрузки на освещение, питание электродвигателей, печей, выпрямителей и т. п. Средние расчетные параметры такой нагрузки даны в табл. 2. Указанные значения отнесены к среднему номинальному напряжению ступени трансформации в месте подключения нагрузки и полной мощности нагрузки (МВ·А).

Двухобмоточные трансформаторы. (рис. 14, а, б). К расчетным паспортным параметрам трансформатора относят: номинальную мощность $S_{\text{ном}}$; номинальные напряжения обмоток $U_{\text{ном}, \text{В}}$ и $U_{\text{ном}, \text{Н}}$; напряжение к. з. u_k %; потери к. з. P_k или отношение x/r .

Поясним сущность параметра $u_k \%$.

Известно, что между обмотками трансформатора имеется только магнитная связь. Эквивалентное электрическое сопротивление первичной и вторичной обмоток трансформатора определяется из опыта к.з. Опыт состоит в следующем: вторичная обмотка трансформатора закорачивается, после чего трансформатор нагружается номинальным током, затем на выводах первичной

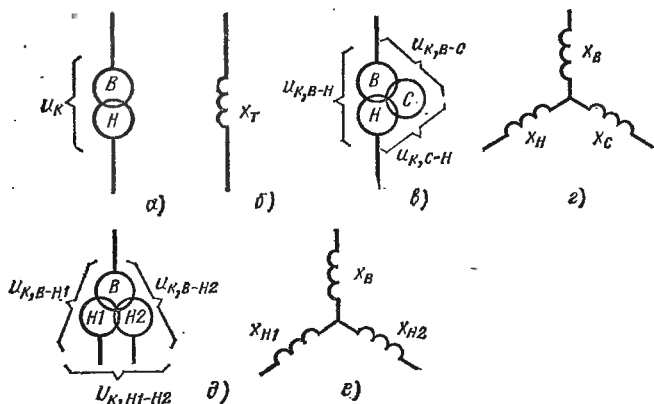


Рис. 14. Двухобмоточный трансформатор (а) и его схема замещения (б); трехобмоточный трансформатор (в) и его схема замещения (г); двухобмоточный трансформатор с расщепленной обмоткой низшего напряжения (д) и его схема замещения (е).

обмотки производятся замеры падения напряжения ΔU и потерь к.з. P_k в трансформаторе.

По данным опыта к.з. вычисляется напряжение к.з. как относительное падение напряжения в сопротивлении трансформатора при прохождении по нему номинального тока:

$$u_k \% = \frac{\Delta U}{U_{\text{НОМ}}} 100 \% = \frac{\sqrt{3} I_{\text{НОМ}} z_T}{U_{\text{НОМ}}} 100 \%, \quad (46)$$

где z_T — эквивалентное электрическое сопротивление обмоток трансформатора.

Сравнив (46) и (31), нетрудно убедиться, что $u_k \%$ соответствует сопротивлению трансформатора в относительных единицах при номинальных условиях, т. е. $u_k \% = z_{T*(\text{НОМ})} \%$.

Индуктивное сопротивление трансформатора исходя из напряжения к. з. u_K и потерь короткого замыкания $P_K = 3I_{\text{ном}}^2 r_T$ определяется как

$$x_{T*} \% = \sqrt{z_{T*}^2 \% - r_{T*}^2 \%}.$$

Но поскольку активное сопротивление трансформаторов сравнительно невелико, обычно принимают $z_{T*} \% \approx x_{T*} \%$ (рис. 14 а, б).

Если для вычисления ударного тока к. з. возникает необходимость в определении активного сопротивления трансформатора r_T , то это можно сделать на основании потерь P_K , взятых из каталога или по кривым x/r (см. [4]).

Трехобмоточные трансформаторы (рис. 14, в, г). Для расчета должны быть даны: номинальная мощность $S_{\text{ном}}$; номинальные напряжения обмоток $U_{\text{ном,В}}$, $U_{\text{ном,С}}$, $U_{\text{ном,Н}}$; напряжения к. з. между обмотками $u_{K,В-С} \%$; $u_{K,В-Н} \%$; $u_{K,С-Н} \%$; потери к. з. P_K или отношение x/r .

Чтобы определить указанные напряжения к. з., опыт к. з. (см. двухобмоточные трансформаторы) проводится 3 раза — между обмотками В-С, В-Н и С-Н, причем каждый раз третья обмотка, не участвующая в опыте, остается разомкнутой.

Из постановки опыта к. з. очевидно, что напряжение к. з. между обмотками можно выразить в виде суммы напряжений к. з. этих обмоток, например $u_{K,В-С} = u_{K,В} + u_{K,С}$.

Записав аналогично в виде суммы все напряжения к. з. трансформатора и решив совместно три уравнения с тремя неизвестными, получим:

$$\begin{aligned} u_{K,В} \% &= \frac{(u_{K,В-С} + u_{K,В-Н} - u_{K,С-Н}) \% }{2}; \\ u_{K,С} \% &= \frac{(u_{K,В-С} + u_{K,С-Н} - u_{K,В-Н}) \% }{2}; \\ u_{K,Н} \% &= \frac{(u_{K,В-Н} + u_{K,С-Н} - u_{K,В-С}) \% }{2}. \end{aligned} \quad (47)$$

¹ Номинальной мощностью трехобмоточного трансформатора $S_{\text{ном}}$ является номинальная мощность наиболее мощной его обмотки; к этой мощности приводятся относительные сопротивления трансформатора и потери к. з.

В расчетах токов к. з. напряжения к. з. трансформатора, определенные из (47) и между обмотками, приравниваются индуктивным сопротивлениям, т. е.

$$u_{к,В} \% \approx x_{В*}(\text{НОМ}) \%;$$

$$u_{к,С} \% \approx x_{С*}(\text{НОМ}) \%;$$

$$u_{к,Н} \% \approx x_{Н*}(\text{НОМ}) \%;$$

$$u_{к,В-С} \% \approx x_{В-С*}(\text{НОМ}) \%;$$

$$u_{к,В-Н} \% \approx x_{В-Н*}(\text{НОМ}) \%;$$

$$u_{к,С-Н} \% \approx x_{С-Н*}(\text{НОМ}) \%.$$

Одновременно с замером напряжения к. з. в каждом опыте к. з. измеряются потери к. з. P_k ; таким образом, в протокол испытания трехобмоточного трансформатора заносят потери к. з. $P_{к,В-С}$, $P_{к,В-Н}$ и $P_{к,С-Н}$.

Потерями к. з. трехобмоточного трансформатора называются максимальные из возможных в трансформаторе потери $P_{к,мах}$. Потери $P_{к,мах}$ указываются в каталоге на трансформатор.

Междуобмоточные активные сопротивления трансформатора определяются по соответствующим потерям к. з.; активные сопротивления обмоток можно получить аналогично u_k , применяя (47). При отсутствии данных по потерям к. з. для ориентировочных расчетов можно пользоваться кривыми x/r , см. [2].

Двухобмоточные трансформаторы с расщепленной обмоткой низшего напряжения (рис. 14, д, е). К расчетным параметрам трансформатора относят: номинальную мощность обмотки высшего напряжения $S_{НОМ,В}$ или номинальную мощность обмотки низшего напряжения $S_{НОМ,Н1(Н2)}^*$; номинальные напряжения обмоток $U_{НСМ,В}$, $U_{НОМ,Н1(Н2)}$; напряжения к. з. между обмотками $u_{к,В-Н1(Н2)} \%$; $u_{к,Н1-Н2} \%$; потери к. з. P_k или отношение x/r .

Выражения для напряжений короткого замыкания каждой обмотки трансформатора аналогичны (47):

$$u_{к,В} \% = \frac{(u_{к,В-Н1} + u_{к,В-Н2} - u_{к,Н1-Н2})}{2} \% ; \quad (48)$$

$$u_{к,Н1(Н2)} \% = \frac{(u_{к,В-Н1(Н2)} + u_{к,Н1-Н2} - u_{к,В-Н2(Н1)})}{2} \% .$$

* Мощность $S_{НОМ,Н1(Н2)} = 0,5 S_{НОМ,В}$

Напряжения к.з. обмоток расщепленного трансформатора по (48) и между обмотками приравниваются к индуктивным сопротивлениям:

$$u_{к,В} \% \approx x_{В* (ном)} \%;$$

$$u_{к,Н1(Н2)} \% \approx x_{Н1(Н2)* ном} \%;$$

$$u_{к,В-Н1(Н2)} \% \approx x_{В-Н1(Н2)* ном} \%;$$

$$u_{к,Н1-Н2} \% \approx x_{Н1-Н2* (ном)} \%.$$

Определение активных сопротивлений расщепленных трансформаторов производится аналогично определению этих сопротивлений для трехобмоточных трансформаторов.

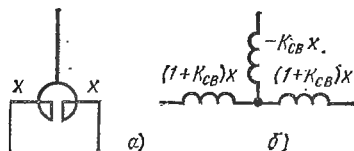


Рис. 15. Сдвоенный реактор (а) и его схема замещения (б).

В отличие от трехобмоточных трансформаторов в каталогах на расщепленные трансформаторы даются потери к.з. для обмоток В-Н1(Н2), отнесенные к мощности обмотки низшего напряжения $S_{ном, Н1(Н2)}$.

Для определения активных сопротивлений трансформатора, если потери к.з. неизвестны, можно применять кривые x/r из [4].

Реакторы. Расчетными параметрами реактора являются: номинальное индуктивное сопротивление в омах или относительных единицах $x_{ном}$ или $x_{*(ном)} \%$; номинальное напряжение $U_{ном}$; номинальный ток $I_{ном}$; номинальные потери ΔP или отношение x/r .

В случае использования сдвоенных реакторов индуктивное сопротивление задается для ветви реактора и, помимо перечисленных параметров, указывается коэффициент связи между ветвями $k_{св}$, обычно $k_{св} = 0,5$ (рис. 15).

Известно, что сдвоенный реактор конструктивно отличается от обычного выводом средней точки обмотки, разделяющим обмотку реактора на две ветви.

Ознакомиться с теорией сдвоенного реактора можно по [6].

Расчет активного сопротивления реакторов производится по номинальным потерям или по отношению x/r из [4]. При использовании потерь на фазу реактора расчет выполняется таким образом: для одинарных реакторов $\Delta P = I_{\text{ном}}^2 r$; для сдвоенных реакторов $\Delta P = 2I_{\text{ном}}^2 r$. *Линии электропередачи.* Сопротивления линий электропередачи в расчетных схемах характеризуются удельными сопротивлениями на 1 км длины.

Индуктивное сопротивление линии зависит от расстояния между проводами и радиуса провода [3].

В качестве средних расчетных значений индуктивного сопротивления на фазу следует принимать:

для воздушных линий:

6—220 кВ	0,4 Ом/км
330 кВ (два провода на фазу)	0,33 Ом/км
400—500 кВ (три провода на фазу)	0,3 Ом/км

для трехжильных кабелей:

35 кВ	0,12 Ом/км
6—10 кВ	0,08 Ом/км
3 кВ	0,07 Ом/км

Активное сопротивление должно учитываться в случаях, если его суммарное значение составляет более одной трети индуктивного сопротивления всех элементов схемы замещения до точки к.з., т.е. когда $r_{\Sigma} \geq 1/3x_{\Sigma}$ или если оно используется для определения затухания апериодического тока к. з. Активное сопротивление линий может быть взято по справочным материалам или для медных и алюминиевых проводов подсчитано

$$r = \frac{l}{\gamma q},$$

где l — длина линий, м; q — сечение провода, м²; γ — удельная проводимость, МСм/м (для меди $\gamma = 53$ МСм/м, для алюминия $\gamma = 32$ МСм/м).

Общее индуктивное сопротивление стальных проводов на 1 км длины определяется как сумма внешнего x' и внутреннего x'' сопротивлений: $x = x' + x''$. Внешнее индуктивное сопротивление принимается равным

Таблица 3. Средние значения активного и внутреннего индуктивного сопротивлений стальных проводов

Марка провода	r , Ом/км	x'' , Ом/км	Марка провода	r , Ом/км	x'' , Ом/км
ПС-70	2,1	0,5	ПС-35	4,5	1,2
ПС-50	3,4	0,8	ПС-25	6,2	1,4

0,4 Ом/км так же, как расчетное сопротивление на фазу линий электропередачи напряжением 6—220 кВ.

Активное r и внутреннее индуктивное x'' сопротивления стальных проводов зависят от тока, который проходит по линии, причем изменение сопротивления провода в свою очередь влияет на ток.

Для точного решения задачи по нахождению тока к.з. при такой зависимости применяют метод последовательных приближений: задавшись сопротивлением, определяют ток по кривым: $r=f(I)$, $x''=f(I)$, корректируют сопротивление и уточняют расчет; вычисления повторяют 2—3 раза.

Однако для приближенного определения тока к.з. можно пользоваться некоторыми средними данными сопротивлений [7], которые приведены в табл. 3.

9. ВЫЧИСЛЕНИЕ НАЧАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СЛАГАЮЩЕЙ ТОКА ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Напомним, что условиями, характеризующими трехфазное к.з., являются симметричность схемы и равенство нулю междупазных и фазных напряжений в месте к.з. (рис. 2):

$$U_{к,AB} = U_{к,BC} = U_{к,CA} = 0;$$

$$U_{к,A} = U_{к,B} = U_{к,C} = 0.$$

Таким образом, разность потенциалов цепи короткого замыкания от места подключения генерирующего источника до точки к.з. равняется э.д.с. данного источника.

Принимая во внимание сказанное, начальное действующее значение периодической слагающей можно определить по закону Ома:

$$I_{п,0}^{(3)} = I''^{(3)} = \frac{E''}{\sqrt{3} \cdot z_{\Sigma}} = \frac{E''}{\sqrt{3} \sqrt{(x'' + x_{вш})^2 + r_{вш}^2}}, \quad (49)$$

где $I'''^{(3)}$ — сверхпереходный ток трехфазного к. з.; E'' — междоузловая сверхпереходная э. д. с. генератора; $z_{\Sigma} = \sqrt{(x'' + x_{вш})^2 + r_{вш}^2}$ — результирующее сопротивление цепи к. з.; x'' — сверхпереходное индуктивное сопротивление генератора; $x_{вш}$, $r_{вш}$ — соответственно индуктивное и активное сопротивление внешней цепи от выводов генератора до точки к. з.

В практических расчетах обычно x_d'' обозначают как x'' , опуская индекс d .

Без учета активного сопротивления (49) упрощается:

$$I_{п,0}^{(3)} = I''^{(3)} = \frac{E''}{\sqrt{3} \cdot x_{\Sigma}} = \frac{E''}{\sqrt{3} (x'' + x_{вш})}, \quad (50)$$

где $x_{\Sigma} = x'' + x_{вш}$ — результирующее индуктивное сопротивление цепи к. з.

В случае питания к. з. от энергосистемы расчетное выражение для определения периодической слагающей приобретает следующий вид:

$$I^{(3)} = \frac{U_{ср}}{\sqrt{3} \cdot z_{\Sigma}} = \frac{U_{ср}}{\sqrt{3} \sqrt{(x_c + x_{вш})^2 + r_{вш}^2}}, \quad (51)$$

где $U_{ср}$ — напряжение на шинах энергосистемы; $z_{\Sigma} = \sqrt{(x_c + x_{вш})^2 + r_{вш}^2}$ — результирующее сопротивление цепи к. з.; x_c — результирующее индуктивное сопротивление энергосистемы относительно места ее подключения в расчетной схеме; $x_{вш}$, $r_{вш}$ — соответственно индуктивное и активное сопротивления от места подключения энергосистемы до точки к. з.

Без учета активного сопротивления периодический ток в данном случае будет равен:

$$I^{(3)} = \frac{U_{ср}}{\sqrt{3} \cdot x_{\Sigma}} = \frac{U_{ср}}{\sqrt{3} (x_c + x_{вш})}, \quad (52)$$

где x_{Σ} — результирующее индуктивное сопротивление цепи к. з.

Зная ток к. з., можно вычислить мощность к. з., которая в заданной точке к. з. при базовом напряжении определится как

$$S_K^{(3)} = \sqrt{3} U_{\text{ср}} I^{(3)}, \quad (53)$$

где $I^{(3)}$ — ток в рассматриваемой точке к. з., приведенный к напряжению $U_{\text{ср}}$.

Расчет в именованных единицах. Определение токов к. з. производится в соответствии с (49) — (52) и формулами пересчета (15) — (20).

Мощность к. з. подсчитывается по (53).

Вычисление сопротивления x_c по заданному току $I^{(3)}$ выполняется на основании (52) при $x_{\text{вн}}=0$:

$$x_c = \frac{U_{\text{ср}}}{\sqrt{3} I^{(3)}}, \quad (54)$$

где $U_{\text{ср}}$ — напряжение на шинах энергосистемы; $I^{(3)}$ — заданный ток к. з., приведенный к напряжению $U_{\text{ср}}$.

Сопротивление x_c по заданной мощности к. з. $S_K^{(3)}$ определяется из соотношения

$$x_c = \frac{U_{\text{ср}}^2}{S_K^{(3)}}. \quad (55)$$

Для определения максимально возможного тока к. з. при повреждении за элементом расчетной схемы, например за линией, трансформатором и т. п., пользуются (52), предполагая, что данный элемент подключен непосредственно к шинам энергосистемы, т. е. считая $x_c=0$:

$$I_{\text{max}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ср}}}{\sqrt{3} x}, \quad (56)$$

где x — индуктивное сопротивление элемента расчетной схемы, Ом.

Пример 3. Определить максимально возможное значение тока трехфазного к. з. в конце линии 110 кВ протяженностью 25 км. За расчетную ступень принимаем $U_{\text{ср}}=115$ кВ. Индуктивное сопротивление линии (§ 8)

$$x = 0,4 \cdot 25 = 10 \text{ Ом.}$$

Искомый ток находим по (56):

$$I_{\text{max}}^{(3)} = \frac{115 \ 000}{\sqrt{3} \cdot 10} = 6650 \text{ А.}$$

Пример 4. Вычислить максимально возможный ток трехфазного к. з. за реактором РБ10-630-25, включенным на напряжение 6,3 кВ. На основании (56)

$$I_{\max}^{(3)} = \frac{6300}{\sqrt{3} \cdot 0,25} = 14\,600 \text{ А.}$$

Пример 5. Составить схему замещения и вычислить ток трёхфазного к. з. не генераторном напряжении 6,3 кВ электростанции А (рис. 16, а).

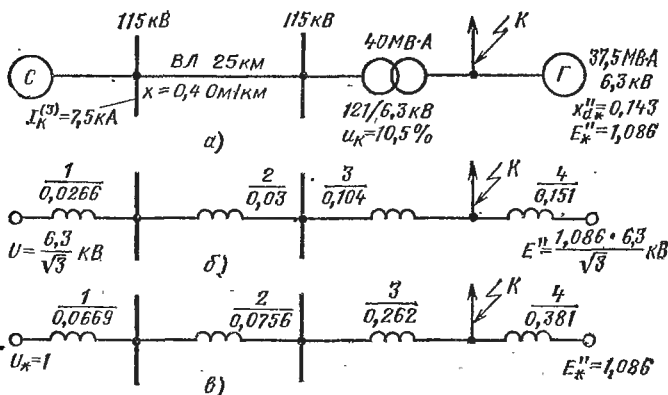


Рис. 16. Схемы к примерам 5 и 15.

а — расчетная схема сети; схемы замещения; б — в имеюнных единицах, в — в относительных единицах.

Номинальные напряжения элементов расчетной схемы приравняем средним напряжениям ступеней по рекомендованной шкале (§ 6).

В качестве основной (базовой) ступени выбираем $U_6 = 6,3$ кВ.

Задаем порядковые номера элементам схемы замещения рис. 16, б и находим их сопротивления.

Энергосистема. В соответствии с (54) и (19)

$$x_1 = \frac{6,3 \cdot 6,3}{\sqrt{3} \cdot 7,5 \cdot 115} \approx 0,0266 \text{ Ом.}$$

ВЛ 110 кВ. На основании § 8 и (20)

$$x_2 = 25 \cdot 0,4 \left(\frac{6,3}{115} \right)^2 = 0,03 \text{ Ом.}$$

Трансформатор 40 МВ·А. По выражению (44) пересчета из относительных в абсолютные значения

$$x_3 = \frac{0,105 \cdot 6,3^2}{40} = 0,104 \text{ Ом.}$$

Генератор 30 МВт. По (44)

$$x_4 = \frac{0,143 \cdot 6,3^2}{37,5} = 0,151 \text{ Ом.}$$

В данном случае схема замещения состоит из двух самостоятельных ветвей с питанием от энергосистемы и от генератора. Очевидно, что параллельное сложение ветвей нецелесообразно.

При расчете тока к. з. по ветвям схемы замещения полный ток в месте повреждения определится как сумма токов от обоих источников питания.

Питание от энергосистемы. Результирующее сопротивление цепи к. з. по (22)

$$x_{\Sigma} = 0,0266 + 0,03 + 0,104 = 0,1606 \text{ Ом.}$$

Ток к. з. в точке К по (52)

$$I_{6,3}^{(3)*} = \frac{6300}{\sqrt{3 \cdot 0,1606}} = 22700 \text{ А.}$$

Питание от генератора. Ток в точке К по (50)

$$I_{6,3}^{(3)} = \frac{1,086 \cdot 6300}{\sqrt{3 \cdot 0,151}} = 26200 \text{ А.}$$

Суммарный ток в месте повреждения

$$I_{6,3}^{(3)} = 22700 + 26200 = 48900 \text{ А.}$$

Пример 6. Определить токи трехфазного к. з. на шинах 10,5 кВ п/ст. А, шинах 10,5 кВ и 0,4 кВ п/ст. Б и шинах 10,5 кВ п/ст. В, а также ударный ток к. з. на шинах 10,5 кВ п/ст. А и Б (рис. 17, а).

За базовую ступень принимаем напряжение 10,5 кВ.

Обозначив элементы расчетной схемы порядковыми номерами, находим их сопротивления.

Энергосистема. На основании (54) и (19)

$$x_1 = \frac{10,5 \cdot 10,5}{\sqrt{3 \cdot 9 \cdot 37}} = 0,191 \text{ Ом.}$$

* Индекс «6,3» говорит о том, что ток приведен к напряжению 6,3 кВ.

Трансформатор 6300 кВ·А п/ст. А. В соответствии с (44)

$$x_2 = x_3 = 0,07 \frac{10,5^2}{6,3} = 1,225 \text{ Ом.}$$

Трансформатор 630 кВ·А п/ст. Б:

$$x_6 = 0,055 \frac{10,5^2}{0,63} = 9,63 \text{ Ом.}$$

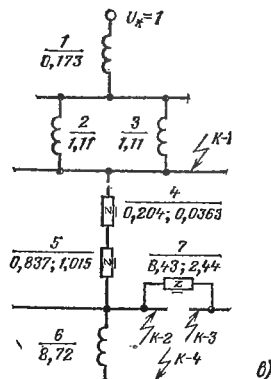
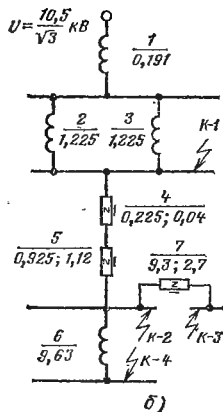
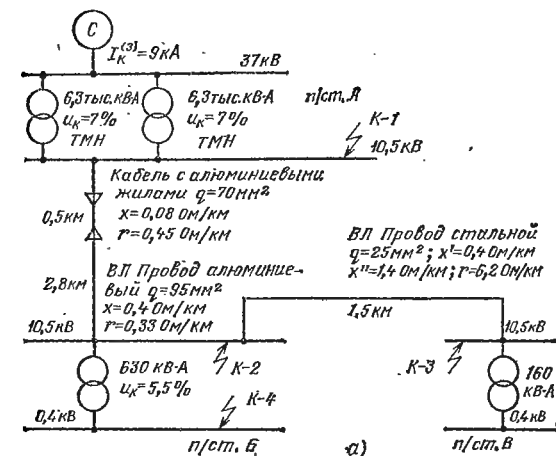


Рис. 17. Схемы к примерам 6 и 16.

а — расчетная схема сети; схемы замещения: б — в именованных единицах; в — в относительных единицах.

Линии 10 кВ (кабель с алюминиевыми жилами и ВЛ с алюминиевыми проводами). Исходя из § 8, подсчитываем сопротивление линий:

$$x_4 = 0,08 \cdot 0,5 = 0,04 \text{ Ом};$$

$$r_4 = 0,45 \cdot 0,5 = 0,225 \text{ Ом};$$

$$x_5 = 0,4 \cdot 2,8 = 1,12 \text{ Ом};$$

$$r_5 = 0,33 \cdot 2,8 = 0,925 \text{ Ом}.$$

ВЛ 10 кВ (со стальными проводами). В соответствии с табл. 3 внутреннее индуктивное сопротивление на 1 км длины для ПС-25 равно $x'' = 1,4 \text{ Ом/км}$, активное $r = 6,2 \text{ Ом/км}$, отсюда:

$$x_7 = (0,4 + 1,4) \cdot 1,5 = 2,7 \text{ Ом};$$

$$r_7 = 6,2 \cdot 1,5 = 9,3 \text{ Ом}.$$

Определяем токи трехфазного к. з.

Короткое замыкание в точке К-1. Результирующее сопротивление цепи к. з. по (22) и (23):

$$x_{\Sigma} = 0,191 + \frac{1,225}{2} \approx 0,804 \text{ Ом}.$$

Ток к. з. в точке К-1 в соответствии с (52)

$$I_{10,5}^{(3)} = \frac{10500}{\sqrt{3 \cdot 0,804}} = 7550 \text{ А}.$$

Расчет ударного тока. За отсутствием данных активное сопротивление системы 37 кВ принято равным нулю. Отношение индуктивного сопротивления к активному и активное сопротивление для трансформаторов 6,3 МВ·А типа ТМН (см. [4]):

$$\frac{x_{2(3)}}{r_{2(3)}} = 10; \quad r_{\Sigma} = 0,1 \frac{1,225}{2} \approx 0,0613 \text{ Ом}.$$

Постоянная времени по (67)

$$T_a = \frac{0,804}{314 \cdot 0,0613} = 0,0418 \text{ с}.$$

Ударный коэффициент, исходя из (66)

$$k_{уд} = 1 + e^{-\frac{0,01}{0,0418}} = 1,79.$$

Ударный ток по (66)

$$i_{уд}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 1,79 \cdot 7550 = 19,1 \text{ кА}.$$

Короткое замыкание в точке К-2. Результирующее индуктивное сопротивление цепи к. з.

$$x_{\Sigma} = 0,191 + \frac{1,225}{2} + 0,04 + 1,12 = 1,914 \text{ Ом.}$$

Результирующее активное сопротивление цепи к. з.

$$r_{\Sigma} = 0,225 + 0,925 = 1,15 \text{ Ом,}$$

При к. з. в точке К-2 $r_{\Sigma} > \frac{1}{3} x_{\Sigma}$, поэтому необходимо учитывать активное сопротивление цепи.

Полное результирующее сопротивление

$$z_{\Sigma} = \sqrt{1,15^2 + 1,964^2} = 2,27 \text{ Ом.}$$

Ток к. з. в точке К-2 на основании (51)

$$I_{10,5}^{(3)} = \frac{10\,500}{\sqrt{3} \cdot 2,27} = 2670 \text{ А.}$$

Расчет ударного тока.

Активное сопротивление цепи к. з. (уточненное) с учетом активного сопротивления трансформаторов $2 \times 6,3 \text{ МВ} \cdot \text{А}^*$

$$r_{\Sigma} = 1,15 + 0,0613 = 1,211 \text{ Ом.}$$

Постоянная времени по (65)

$$T_a = \frac{1,964}{314 \cdot 1,211} = 0,00518 \text{ с.}$$

Ударный коэффициент в соответствии с (64)

$$k_{уд} = 1 + e^{-\frac{0,01}{0,00518}} = 1,15.$$

Ударный ток по (64)

$$i_{уд}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 1,15 \cdot 2670 = 4,35 \text{ кА.}$$

Короткое замыкание в точке К-3. Аналогично расчетам для точки к. з. К-2 производим учет активного сопротивления.

Результирующее индуктивное сопротивление цепи к. з. с использованием подсчитанного сопротивления до точки к. з. К-2

$$x_{\Sigma} = 1,964 + 2,7 \approx 4,66 \text{ Ом.}$$

* В точке К-2 учет активного сопротивления трансформаторов $2 \times 6,3 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ не обязателен; учет произведен для аналогии с расчетом $i_{уд}$ в точке К-1.

Результирующее активное сопротивление цепи к. з. с учетом сопротивления до точки К-2

$$r_{\Sigma} = 1,15 + 9,3 = 10,45 \text{ Ом.}$$

Полное результирующее сопротивление

$$z_{\Sigma} = \sqrt{10,45^2 + 4,66^2} = 11,44 \text{ Ом.}$$

Ток к. з. в точке К-3

$$I_{10,5}^{(3)} = \frac{10\,500}{\sqrt{3 \cdot 11,44}} = 530 \text{ А.}$$

Короткое замыкание в точке К-4. Результирующее индуктивное сопротивление цепи к. з., исходя из сопротивления до точки к. з. К-2,

$$x_{\Sigma} = 1,964 + 9,63 \approx 11,59 \text{ Ом.}$$

Результирующее активное сопротивление $r_{\Sigma} = 1,15 \text{ Ом.}$

Значение активного сопротивления таково $\left(r_{\Sigma} < \frac{1}{3}x_{\Sigma}\right)$, что учет его необязателен.

Ток к. з. в точке К-4, приведенный к стороне высшего напряжения 10,5 кВ трансформатора п/ст. Б,

$$I_{10,5}^{(3)} = \frac{10\,500}{\sqrt{3 \cdot 11,59}} = 524 \text{ А.}$$

Пример 7. Определить токи трехфазного к. з. на шинах 37 кВ и 6,3 кВ п/ст. А, шинах 6,3 кВ п/ст. Б и шинах 6,3 и 0,4 кВ п/ст. В, а также ударный ток при к. з. на шинах 37 и 6,3 кВ п/ст. А (рис. 18, а).

За основную ступень напряжения принимаем $U_6 = 115 \text{ кВ.}$

Находим сопротивления элементов расчетной схемы, приведенные к напряжению $U_6 = 115 \text{ кВ.}$

Энергосистема а. В соответствии с (54)

$$x_1 = \frac{115}{\sqrt{3 \cdot 8,7}} = 7,64 \text{ Ом.}$$

ВЛ 110 кВ. По указаниям § 8

$$x_2 = 0,4 \cdot 12 = 4,8 \text{ Ом.}$$

ВЛ 35 кВ. По § 8 и (20)

$$x_5 = 0,4 \cdot 10 \left(\frac{115}{37}\right)^2 = 38,7 \text{ Ом.}$$

$$x_8 = 0,08 \cdot 2 \left(\frac{115}{6,3} \right)^2 = 53,2 \text{ Ом};$$

$$r_8 = 0,33 \cdot 2 \left(\frac{115}{6,3} \right)^2 = 220 \text{ Ом}.$$

Учет активного сопротивления производим в соответствии с § 8. Трехобмоточный трансформатор п/ст. А. На основании (44)

$$x_{3,I} = x_{4,I} = 0,11 \frac{115^2}{10} = 145,5 \text{ Ом};$$

$$x_{3,II} = x_{4,II} = 0,06 \frac{115^2}{10} = 79,3 \text{ Ом}.$$

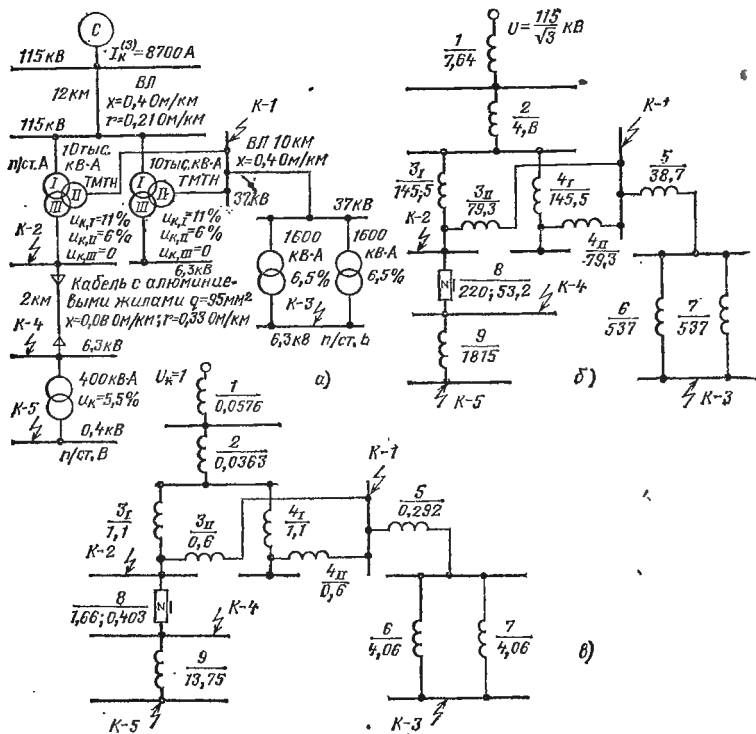


Рис. 18. Схемы к примерам 7 и 17.

а — расчетная схема сети; схемы замещения: б — в именованных единицах; в — в относительных единицах.

Двухобмоточный трансформатор п/ст. Б. По (44)
и (20)

$$x_6 = x_7 = 0,065 \frac{115^2}{1,6} = 537 \text{ Ом.}$$

Двухобмоточный трансформатор п/ст. В

$$x_9 = 0,055 \frac{115^2}{0,4} = 1815 \text{ Ом.}$$

Короткое замыкание в точке К-1. Суммарное сопротивление трехобмоточных трансформаторов

$$x_{3,4-37} = \frac{145,5 + 79,3}{2} = 112,4 \text{ Ом.}$$

Результирующее сопротивление цепи к. з. по (22) и (23)

$$x_{\Sigma} = 7,64 + 4,8 + 112,4 \approx 124,8 \text{ Ом.}$$

Поскольку расчет ведется по напряжению $U_6 = 115$ кВ, ток к. з., определенный по результирующему сопротивлению, также получается отнесенным к этому напряжению.

Ток к. з. в точке К-1 определим, используя (52):

$$I_{115}^{(3)} = \frac{115 \cdot 1000}{\sqrt{3 \cdot 124,8}} = 532 \text{ А.}$$

Для вычисления действительного значения тока к. з. на данной ступени полученный ток нужно привести к напряжению 37 кВ по (19):

$$I_{37}^{(3)} = 532 \frac{115}{37} = 1650 \text{ А.}$$

Ударный ток в точке К-1 вычисляем в соответствии с (64) и (65).

Активным сопротивлением энергосистемы пренебрегаем.

Активное сопротивление линии 115 кВ

$$r_2 = 0,21 \cdot 12 = 2,52 \text{ Ом.}$$

Отношение индуктивного сопротивления к активному и активное сопротивление трехобмоточных трансформаторов (см. [4]):

$$\frac{x_3}{r_3} = \frac{x_4}{r_4} = 21,5; \quad r_{3-37} = r_{4-37} = \frac{112,4}{21,5} = 5,23 \text{ Ом.}$$

Суммарное активное сопротивление

$$r_{\Sigma} = 2,52 + 5,23 = 7,75 \text{ Ом.}$$

Постоянная времени

$$T_a = \frac{124,8}{314 \cdot 7,75} = 0,0514 \text{ с.}$$

Ударный коэффициент

$$k_{уд} = 1 + e^{-\frac{0,01}{0,0514}} = 1,82.$$

Ударный ток

$$i_{уд}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 1,82 \cdot 1,65 = 4,25 \text{ кА.}$$

Короткое замыкание в точке К-2. Суммарное сопротивление трехобмоточных трансформаторов.

$$x_{3,4-6,3} = 145,5 // (145,5 + 2 \cdot 79,3) \approx 98,5 \text{ Ом.}$$

Результатирующее сопротивление цепи к. з.

$$x_{\Sigma} = 7,64 + 4,8 + 98,5 \approx 110,9 \text{ Ом.}$$

Ток к. з. в точке К-2

$$I_{115}^{(3)} = \frac{115\,000}{\sqrt{3 \cdot 110,9}} = 600 \text{ А.}$$

Ток к. з. в точке К-2, приведенный к напряжению данной ступени 6,3 кВ,

$$I_{6,3}^{(3)} = 600 \frac{115}{6,3} = 10\,900 \text{ А.}$$

Ударный ток в точке К-2

Активное сопротивление трехобмоточных трансформаторов

$$r_{3,4-6,3} = \frac{98,5}{21,5} = 4,58 \text{ Ом.}$$

Суммарное активное сопротивление

$$r_{\Sigma} = 2,52 + 4,58 = 7,1 \text{ Ом.}$$

Постоянная времени

$$T_a = \frac{110,9}{314 \cdot 7,1} = 0,0498 \text{ с.}$$

Ударный коэффициент

$$k_{уд} = 1 + e^{-\frac{0,01}{0,0498}} = 1,82.$$

Ударный ток

$$i_{уд}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 1,82 \cdot 10,9 = 28,1 \text{ кА.}$$

Короткое замыкание в точке К-3. Для определения результирующего сопротивления используется подсчитанное выше сопротивление цепи к. з. для точки К-1 $x=124,8$ Ом. С учетом этого результирующее сопротивление цепи к. з.

$$x_{\Sigma} = 124,8 + 38,7 + \frac{537}{2} = 432 \text{ Ом.}$$

Ток к. з. в точке К-3

$$I_{115}^{(3)} = \frac{115\,000}{\sqrt{3 \cdot 432}} = 153,5 \text{ А.}$$

Ток к. з. в точке К-3, приведенный к напряжению данной ступени 6,3 кВ,

$$I_{6,3}^{(3)} = 153,5 \frac{115}{6,3} = 2800 \text{ А.}$$

Короткое замыкание в точке К-4. Результирующее индуктивное сопротивление цепи к. з. с использованием сопротивления цепи до точки К-2

$$x_{\Sigma} = 110,9 + 53,2 \approx 164 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление цепи к. з. $r_{\Sigma} = 220$ Ом.

При расчете тока к. з. в точке К-4 необходим учет активного сопротивления, поскольку $r_{\Sigma} > \frac{1}{3} x_{\Sigma}$.

Полное сопротивление цепи к. з.

$$z_{\Sigma} = \sqrt{220^2 + 164^2} = 275 \text{ Ом.}$$

Ток к. з. в точке К-4 на основании (51)

$$I_{115}^{(3)} = \frac{115\,000}{\sqrt{3 \cdot 275}} = 242 \text{ А.}$$

Ток к. з. в точке К-4, приведенный к напряжению ступени 6,3 кВ,

$$I_{6,3}^{(3)} = 242 \frac{115}{6,3} = 4420 \text{ А.}$$

Короткое замыкание в точке К-5. Учитывать активное сопротивление кабельной линии 6 кВ при расчете к. з. в точке К-5 не требуется.

Результирующее сопротивление цепи к. з. с учетом сопротивления до точки К-4

$$x_{\Sigma} = 164 + 1815 \approx 1980 \text{ Ом.}$$

Ток к. з. в точке К-5

$$I_{115}^{(3)} = \frac{115\,000}{\sqrt{3 \cdot 1980}} = 33,5 \text{ А.}$$

Ток к. з. в точке К-5, приведенный к первичному напряжению 6,3 кВ трансформатора п/ст. В,

$$I_{6,3}^{(3)} = 33,5 \frac{115}{6,3} = 611 \text{ А.}$$

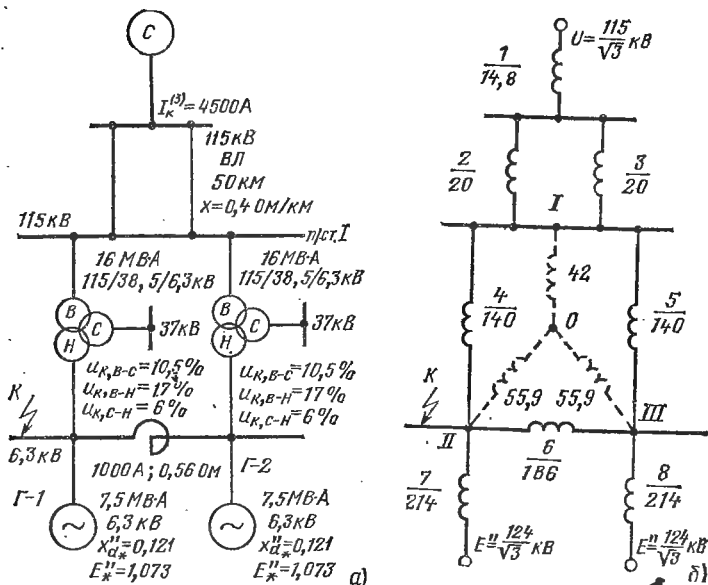


Рис. 19. Схемы к примеру 8.

а — расчетная схема сети; б — схема замещения.

Пример 8. Определить ток трехфазного к. з. на шинах 6,3 кВ п/ст. 1 (рис. 19, а).

Номинальные напряжения элементов схемы приравниваем средним напряжениям ступеней трансформации. За базовую ступень напряжения принимаем $U_6 = 115$ кВ.

Находим сопротивления элементов схемы замещения.

Энергосистема. По выражению (54)

$$x_1 = \frac{115\,000}{\sqrt{3 \cdot 4500}} = 14,8 \text{ Ом.}$$

В Л 110 кВ. В соответствии с § 8

$$x_2 = x_3 = 50 \cdot 0,4 = 20 \text{ Ом.}$$

Трансформатор 16 МВ·А п/ст. 1. Применяя (44), получим:

$$x_4 = x_5 = 0,17 \frac{115^2}{16} = 140 \text{ Ом.}$$

Сопротивление трансформатора при к. з. на 6,3 кВ находим по относительному номинальному сопротивлению $u_{к,в-н} \approx x_{в-н*}(\text{ном})$. В самом деле, если в цепь к. з. включены две обмотки трехобмоточного трансформатора, а со стороны третьей обмотки подпитка места к. з. отсутствует, нет необходимости вычислять напряжения к. з. каждой обмотки, а достаточно располагать паспортными напряжениями к. з. между обмотками и по ним непосредственно определять искомые сопротивления.

Реактор. По (20)

$$x_6 = 0,56 \left(\frac{115}{6,3} \right)^2 = 186 \text{ Ом.}$$

Генератор 7,5 МВ·А. По (44) и (20)

$$x_7 = x_8 = 0,121 \frac{115^2}{7,5} = 214 \text{ Ом.}$$

Как видно из схемы замещения, сопротивления x_4 , x_5 , x_6 соединены в треугольник и для нахождения тока в точке К-1 указанный треугольник необходимо преобразовать в эквивалентную звезду. По (24)

$$x_I = \frac{140 \cdot 140}{140 + 140 + 186} = 42 \text{ Ом;}$$

$$x_{II} = \frac{186 \cdot 140}{140 + 140 + 186} = 55,9 \text{ Ом;}$$

$$x_{III} = \frac{140 \cdot 186}{140 + 140 + 186} = 55,9 \text{ Ом.}$$

В результате преобразований суммарные сопротивления со стороны энергосистемы и генератора Г-2 до нулевой точки эквивалентной звезды равны:

$$x_{\Sigma,с} = 14,8 + \frac{20}{2} + 42 = 66,8 \text{ Ом;}$$

$$x_{\Sigma,г} = 214 + 55,9 \approx 270 \text{ Ом.}$$

Эквивалентная э. д. с. система — генератор Г-2 определится по (21):

$$E_{\text{ЭН}} = \frac{\frac{115}{\sqrt{3}} \frac{1}{66,8} + \frac{124}{\sqrt{3}} \frac{1}{270}}{\frac{1}{66,8} + \frac{1}{270}} = 67,4 \text{ кВ.}$$

Результирующее сопротивление между точкой приложения эквивалентной э. д. с. и точкой к. з. К

$$x_{\Sigma} = (66,8 // 270) + 55,9 = 109,4 \text{ Ом.}$$

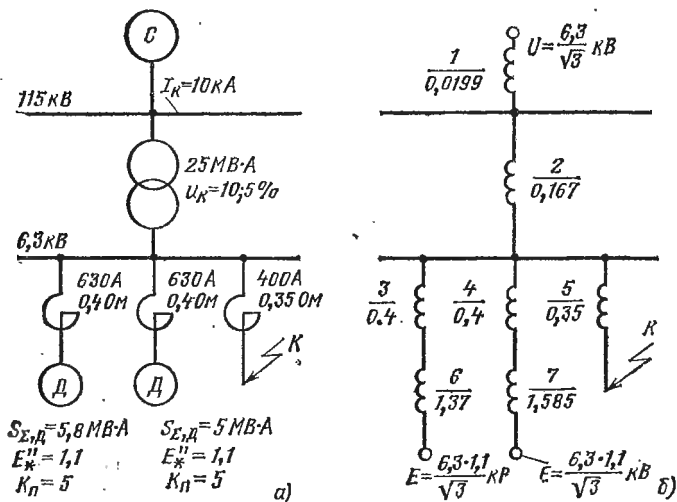


Рис. 20. Схемы к примеру 9.

а — расчетная схема сети; б — схема замещения.

Ток в точке К от эквивалентного источника по (50)

$$I_{115}^{(3)} = \frac{67\,400}{109,4} = 615 \text{ А.}$$

Ток в точке К от генератора Г-1 также по выражению (50)

$$I_{116}^{(3)} = \frac{124\,000}{\sqrt{3} \cdot 214} = 335 \text{ А.}$$

Суммарный ток в точке К, приведенный к расчетному напряжению $U_0 = 115 \text{ кВ}$

$$I_{\Sigma 115}^{(3)} = 615 + 335 = 950 \text{ А.}$$

" Суммарный ток в точке K , приведенный к среднему напряжению данной ступени $U=6,3$ кВ

$$I_{\Sigma 6,3}^{(3)} = 950 \frac{115}{6,3} = 17\,300 \text{ А.}$$

Пример 9. Определить ток трехфазного к. з. в точке K за реактором отходящей линии 6,3 кВ схемы рис. 20, а для начального момента времени.

За основную ступень трансформации принимаем $U_6=6,3$ кВ.

По (54), (19) и (44) определяем сопротивления энергосистемы, трансформатора и двигателей.

Обозначив сопротивления схемы замещения порядковыми номерами, получим:

для энергосистемы

$$x_1 = \frac{6,3 \cdot 6,3}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 115} = 0,0199 \text{ Ом;}$$

для трансформатора 25 МВ·А

$$x_2 = \frac{0,105 \cdot 6,3^2}{25} = 0,167 \text{ Ом.}$$

для синхронных двигателей

$$x_6 = \frac{0,2 \cdot 6,3^2}{5,8} = 1,37 \text{ Ом;}$$

$$x_7 = \frac{0,2 \cdot 6,3^2}{5} = 1,585 \text{ Ом.}$$

Сопротивление цепи к. з. от энергосистемы до шин 6,3 кВ

$$x_{\Sigma, c} = 0,0199 + 0,167 = 0,1869 \text{ Ом.}$$

То же для синхронных двигателей:

$$x_{д, \Sigma 1} = 1,37 + 0,4 = 1,77 \text{ Ом;}$$

$$x_{д, \Sigma 2} = 1,585 + 0,4 = 1,985 \text{ Ом;}$$

$$x_{д, \Sigma} = 1,77 // 1,985 = 0,936 \text{ Ом.}$$

Результирующее сопротивление цепи к. з.

$$x_{\Sigma} = x_{\Sigma, c} // x_{д, \Sigma} + x_b = 0,1869 // 0,936 + 0,35 = 0,1557 + 0,35 \approx 0,506 \text{ Ом.}$$

Эквивалентная э. д. с. по (21)

$$E_{\Sigma} = \frac{\frac{6300}{\sqrt{3}} \left(\frac{1}{0,1869} + \frac{1,1}{0,936} \right)}{\frac{1}{0,1869} + \frac{1}{0,936}} = \frac{6300}{\sqrt{3}} \cdot 1,0167 \text{ В.}$$

Ток за реактором отходящей линии 6,3 кВ по (52)

$$I_{\text{к}}^{(3)} = \frac{6300 \cdot 1,0167}{\sqrt{3} \cdot 0,506} = 7310 \text{ А.}$$

В случае уравнивания э. д. с. электродвигателей с э. д. с. системы погрешность в расчете в сторону уменьшения тока составит 1,67 %.

Пример 10. Определить ток трехфазного к. з. в точке К (рис. 21, а).

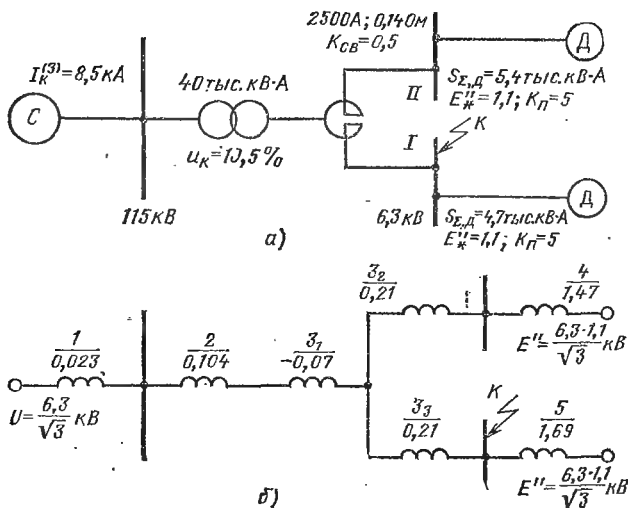


Рис. 21. Схемы к примеру 10.

а — расчетная схема сети; б — схема замещения.

За основную ступень напряжения принимаем напряжение 6,3 кВ секционированных шин подстанции.

Сопротивления элементов схемы замещения подсчитываем по (54), (19), (44) и § 8.

Энергосистема

$$x_1 = \frac{6,3 \cdot 6,3}{\sqrt{3} \cdot 115 \cdot 8,5} = 0,023 \text{ Ом.}$$

Трансформатор 40 МВ·А

$$x_2 = \frac{0,105 \cdot 6,3^2}{40} = 0,104 \text{ Ом.}$$

Сдвоенный реактор

$$x_{31} = -0,5 \cdot 0,14 = -0,07 \text{ Ом};$$

$$x_{32} = x_{33} = 1,5 \cdot 0,14 = 0,21 \text{ Ом}.$$

Синхронные двигатели

$$x_4 = \frac{0,2 \cdot 6,3^2}{5,4} = 1,47 \text{ Ом};$$

$$x_5 = \frac{0,2 \cdot 6,3^2}{4,7} = 1,69 \text{ Ом}.$$

На основании § 5 подпитку места к. з. синхронными электродвигателями секции II в расчет не принимаем. Результирующее сопротивление энергосистемы при к. з. в точке К

$$x_{\Sigma} = 0,023 + 0,104 - 0,07 + 0,21 = 0,267 \text{ Ом}.$$

Ток к. з. от энергосистемы в точке К по (52)

$$I_{6,3}^{(3)} = \frac{6300}{\sqrt{3 \cdot 0,267}} = 13620 \text{ А}.$$

Ток к. з. в точке К от двигателей $S_{\Sigma, д} = 4,7$ тыс. кВт·А по (50)

$$I_{6,3}^{(3)} = \frac{6300 \cdot 1,1}{\sqrt{3 \cdot 1,69}} = 2370 \text{ А}.$$

Суммарный ток к. з. в точке К

$$I_{\Sigma 6,3}^{(3)} = 13620 + 2370 = 15990 \text{ А}.$$

Для сравнения рассчитаем ток к. з. в точке К с учетом электродвигателей секции II и одновременно определим погрешность в токе к. з. от неучета указанных двигателей.

Результирующее сопротивление ветвей — энергосистемы и электродвигателей $S_{\Sigma, д} = 5,4$ тыс. кВт·А

$$x_{\Sigma} = \frac{(0,023 + 0,104 - 0,07)(0,21 + 1,47)}{0,023 + 0,104 - 0,07 + 0,21 + 1,47} + 0,21 = 0,265 \text{ Ом}.$$

В связи с тем, что эквивалентная э. д. с. энергосистема — электродвигатели 5,4 тыс. кВт·А незначительно превышает напряжение, определение тока производим при напряжении системы.

Ток к. з. в точке К от энергосистемы и электродвигателей $S_{\Sigma, д} = 5,4$ тыс. кВт·А по (52),

$$I_{6,3}^{(3)} = \frac{6300}{\sqrt{3 \cdot 0,265}} = 13730 \text{ А}.$$

$$I_{\Sigma 6,3}^{(3)} = 13730 + 2370 = 16100 \text{ А.}$$

Как показал расчет, учет электродвигателей секции II практически не изменяет значения тока к. з. на секции I. Погрешность в токе $I_{\Sigma 6,3}^{(3)}$ от пренебрежения током к. з. от электродвигателей секции II составляет менее 1 %

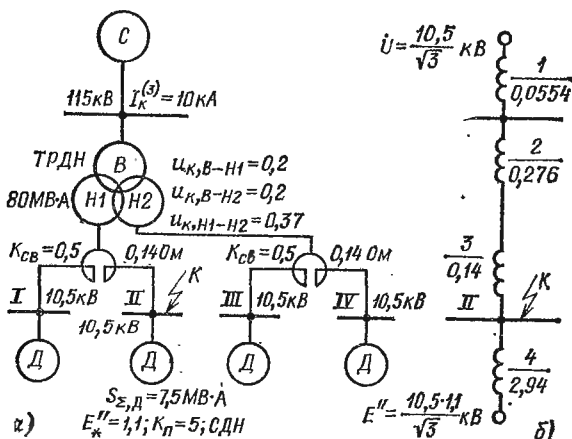


Рис. 22. Схемы к примеру 11.

а — расчетная схема сети; б — схема замещения.

Пример 11. Рассчитать ток к. з. для начального момента времени и ударный ток к. з. при повреждении на секции II 10,5 кВ схемы рис. 22. В качестве базового напряжения принимаем $U_6 = 10,5 \text{ кВ}$.

Схему замещения составляем в соответствии с § 5, учитывая из присоединенных электродвигателей только синхронные двигатели секции II, непосредственно связанные с местом к. з.

Сопротивления элементов схемы замещения определяем по (44), (54) и (19), в результате чего получим:

для энергосистемы

$$x_1 = \frac{10,5}{\sqrt{3}} \frac{10,5}{115 \cdot 10} = 0,0554 \text{ Ом;}$$

для трансформатора

$$x_2 = 0,2 \frac{10,5^2}{80} = 0,276 \text{ Ом};$$

для сдвоенного реактора

$$x_3 = 0,14 \text{ Ом};$$

для синхронных двигателей

$$x_4 = 0,2 \frac{10,5^2}{7,5} = 2,94 \text{ Ом}.$$

Результирующее сопротивление системы до точки к. з.

$$x_{\Sigma} = 0,0554 + 0,276 + 0,14 = 0,4714 \text{ Ом}.$$

Ток к. з. на секции II от энергосистемы

$$I_{10,5}^{(3)} = \frac{10,5}{\sqrt{3 \cdot 0,4714}} = 12,86 \text{ кА}.$$

Ток к. з. от электродвигателей секции II

$$I_{10,5\text{дII}}^{(3)} = \frac{10,5 \cdot 1,1}{\sqrt{3 \cdot 2,94}} = 2,27 \text{ кА}.$$

Суммарный ток к. з. на секции II

$$I_{\Sigma 10,5}^{(3)} = 12,86 + 2,27 = 15,13 \text{ кА}.$$

Расчет ударного тока на секции II производим по (64), (65) и (68); энергосистему 115 кВ учитываем только индуктивным сопротивлением.

Отношение индуктивного сопротивления к активному и активное сопротивление:

трансформатора 80 МВ·А типа ТРДН (см. [4])

$$\frac{x_2}{r_2} = 27, \quad r_2 = \frac{0,276}{27} = 0,0102 \text{ Ом};$$

сдвоенного реактора типа РБС (см. [4])

$$\frac{x_3}{r_3} = 62,6 \quad r_3 = \frac{0,14}{62,6} = 0,00224 \text{ Ом}.$$

Суммарное активное сопротивление цепи энергосистемы до точки к. з.

$$r_{\Sigma} = 0,0102 + 0,00224 = 0,01244 \text{ Ом}.$$

Постоянная времени энергосистемы

$$T_{a, c10,5} = \frac{0,4714}{314 \cdot 0,01244} = 0,121 \text{ с}.$$

Ударный коэффициент для тока к. з. от энергосистемы

$$k_{уд} = 1 + e^{-\frac{0,01}{0,121}} = 1,92.$$

Ударный ток от энергосистемы

$$i_{уд,с} = \sqrt{2 \cdot 1,92 \cdot 12,86} = 34,92 \text{ кА.}$$

Ударный коэффициент для тока к. з. от электродвигателей типа СДН (при единичной мощности 1 МВт) $k_{уд,д} = 1,82$.

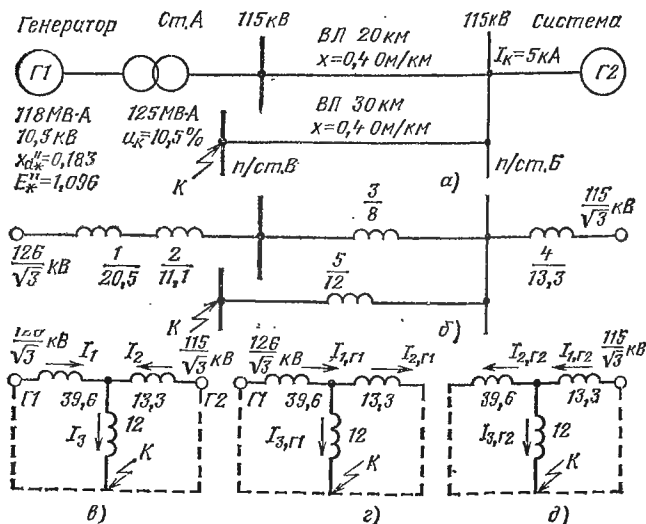


Рис. 23. Схемы к примеру 12.

а — расчетная схема сети; б — схема замещения; в, г, д — схемы для расчета тока к. з. по методу наложения.

Ударный ток от электродвигателей секции II

$$i_{уд,д} = \sqrt{2 \cdot 1,82 \cdot 2,27} = 5,84 \text{ кА.}$$

Ударный ток на секции II

$$i_{уд} = i_{уд,с} + i_{уд,д} = 34,92 + 5,84 = 40,76 \text{ кА.}$$

Пример 12. Определить токи трехфазного к. з. на шинах 115 кВ п/ст. В от блока генератор — трансформатор и энергосистемы, пользуясь принципом наложения (рис. 23).

За основную ступень трансформации принимаем $U_6 = 115 \text{ кВ.}$

По (44), (54) и (20) определяем сопротивления генератора, трансформатора и энергосистемы.

Обозначив сопротивления схемы замещения порядковыми номерами, получим:

для генератора 118 МВ·А

$$x_1 = \frac{0,183 \cdot 115^2}{118} = 20,5 \text{ Ом};$$

для трансформатора 125 МВ·А

$$x_2 = \frac{0,105 \cdot 115^2}{125} = 11,1 \text{ Ом};$$

для ВЛ 115 кВ

$$x_3 = 0,4 \cdot 20 = 8 \text{ Ом},$$

$$x_5 = 0,4 \cdot 30 = 12 \text{ Ом};$$

для энергосистемы

$$x_4 = \frac{115}{\sqrt{3 \cdot 5}} = 13,3 \text{ Ом}.$$

Определим сопротивления и токи в схемах условных режимов (23, з, д).

Сопротивление генератора, трансформатора и ВЛ 20 км

$$x_1 + x_2 + x_3 = 20,5 + 11,1 + 8 = 39,6 \text{ Ом}.$$

Результирующее сопротивление в цепи генератора Г1

$$x_{\Sigma Г1} = 39,6 + \frac{13,3 \cdot 12}{13,3 + 12} = 45,9 \text{ Ом}.$$

Ток к. з. от генератора Г1

$$I_{1, Г1} = \frac{126}{\sqrt{3 \cdot 45,9}} = 1,585 \text{ кА}.$$

Распределение тока $I_{1, Г1}$ по ветвям:

$$I_{2, Г1} = 1,585 \frac{12}{25,3} = 0,752 \text{ кА};$$

$$I_{3, Г1} = 1,585 - 0,752 = 0,833 \text{ кА}.$$

Результирующее сопротивление в цепи генератора Г2

$$x_{\Sigma, Г2} = 13,3 + \frac{39,6 \cdot 12}{39,6 + 12} = 22,5 \text{ Ом}.$$

Ток к. з. от генератора Г2

$$I_{1,Г2} = \frac{115}{\sqrt{3 \cdot 22,5}} = 2,95 \text{ кА.}$$

Распределение тока $I_{1,Г2}$ по ветвям:

$$I_{2,Г2} = 2,95 \frac{12}{51,6} = 0,686 \text{ кА;}$$

$$I_{3,Г2} = 2,95 - 0,686 = 2,264 \text{ кА.}$$

Совмещая результаты вычислений условных режимов по (27), определим токи в месте к. з.

Ток к. з. от блока генератор — трансформатор

$$I_{1;115}^{(3)} = 1,585 - 0,686 \approx 0,9 \text{ кА.}$$

Ток к. з. от энергосистемы

$$I_{2;115}^{(3)} = 2,95 - 0,752 = 2,198 \text{ кА.}$$

Суммарный ток к. з. на шинах 115 кВ п/ст. В

$$I_{3;115}^{(3)} = 0,833 + 2,264 = 3,097 \text{ кА.}$$

В заключение проверим целесообразность решения данного примера по принципу наложения, для чего произведем сравнительный расчет, исходя из равенства приведенной э. д. с. генератора среднему расчетному напряжению сети $U_6 = 115$ кВ.

Суммарное сопротивление ветвей эквивалентной схемы до шин п/ст. В

$$x_{\Sigma,1} = \frac{39,6 \cdot 13,3}{39,6 + 13,3} = 9,96 \text{ Ом.}$$

Результирующее сопротивление цепи к. з.

$$x_{\Sigma} = 9,96 + 12 = 21,96 \text{ Ом.}$$

Суммарный ток в месте к. з.

$$I_{3;115}^{(3)} = \frac{115}{\sqrt{3 \cdot 21,96}} = 3,03 \text{ кА.}$$

Ток к. з. от блока генератор — трансформатор

$$I_{1;115}^{(3)} = 3,03 \frac{9,96}{39,6} = 0,762 \text{ кА.}$$

Ток к. з. от энергосистемы

$$I_{2;115}^{(3)} = 3,03 - 0,762 = 2,268 \text{ кА.}$$

Отношение токов к. з. от блока генератор — трансформатор, полученных при расчетах по принципу наложения и при равенстве э. д. с. генератора напряжению сети

$$k_1 = \frac{0,9}{0,762} = 1,18.$$

То же для токов к. з. от энергосистемы:

$$k_2 = \frac{2,198}{2,268} = 0,97.$$

То же для суммарного тока в месте к. з.

$$k_3 = \frac{3,097}{3,03} = 1,02.$$

Расчет показывает, что введение э. д. с. генератора вместо среднего расчетного напряжения дает некоторое увеличение тока в ВЛ ст. А—п/ст. Б и в блоке генератор — трансформатор, а на значениях тока со стороны энергосистемы и суммарного тока в месте к. з. практически не сказывается.

Следовательно, применение принципа наложения в подобных случаях имеет смысл только для уточнения тока к. з., притекающего со стороны станции.

Расчет в относительных единицах. На основании (29)

$$I^{(3)} = I_{*(6)}^{(3)} I_6.$$

Поскольку базовый ток известен, задача состоит в определении относительного тока к. з.

Независимо от способа расчета — в именованных или относительных единицах — конечные результаты вычислений должны быть одинаковыми. Поэтому очевидно, что формулы для определения тока к. з. в относительных единицах могут быть получены путем преобразования (49) — (52).

Подставим значение сопротивления z из (31) для определения z_* в (49), в результате чего получим:

$$I_{п,0}^{(3)} = I'^{(3)} = \frac{\frac{E''}{U_6}}{z_{\Sigma*(6)}} I_6,$$

или

$$I_{п,0}^{(3)} = I'^{(3)} = \frac{E''_{*(6)}}{z_{\Sigma*(6)}} I_6, \quad (57)$$

где $E_{*(6)}''$ — относительная э. д. с., приведенная к базовым условиям; $z_{\Sigma*(6)}$ — результирующее относительное сопротивление цепи к. з., приведенное к базовым условиям; $\frac{E_{*(6)}''}{z_{\Sigma*(6)}} = I_{*(6)}^{(3)}$ — относительный ток к. з.

Аналогично (50) без учета активного сопротивления

$$I_{п,0}^{(3)} = I^{(3)} = \frac{E_{*(6)}''}{x_{\Sigma*(6)}} I_6. \quad (58)$$

Если источником питания в расчетной схеме сети является энергосистема, то, как известно, э. д. с. системы и напряжение на ее шинах равны $E_{*(6)}'' = U_{ср*(6)} = 1$; отсюда

$$I^{(3)} = \frac{1}{z_{\Sigma*(6)}} I_6. \quad (59)$$

Без учета активного сопротивления

$$I^{(3)} = \frac{1}{x_{\Sigma*(6)}} I_6. \quad (60)$$

Расчет токов к. з. в относительных единицах производится в соответствии с (57) — (60) и (28) — (43).

В развитие сказанного в предыдущем параграфе коротко остановимся на определении сопротивления $x_{с*(6)}$. Если сопротивление x_c задано в омах, то перевод его в относительные единицы производится обычным способом по (31).

Если же в качестве характеристики энергосистемы задан ток $I_k^{(3)}$ или мощность $S_k^{(3)}$, сопротивление $x_{с*(6)}$ определяется соответственно:

по току на основании (54) и (31)

$$x_{с*(6)} = \frac{I_6}{I_k^{(3)}}; \quad (61)$$

по мощности, исходя из (55) и (31),

$$x_{с*(6)} = \frac{S_6}{S_k^{(3)}}. \quad (62)$$

Максимальное значение тока к. з. при подключении элемента расчетной схемы непосредственно к шинам

энергосистемы ($x_{с*}=0$), на основании (60), при условии $I_6 = I_{\text{НОМ}}$ равно:

$$I_{\text{max}}^{(3)} = \frac{1}{x_{*}(\text{НОМ})} I_{\text{НОМ}}, \quad (63)$$

или

$$I_{\text{max}}^{(3)} = \frac{100}{x_{*}(\text{НОМ}) \% } I_{\text{НОМ}},$$

где $I_{\text{НОМ}}$ — номинальный ток элемента расчетной схемы; $x_{*}(\text{НОМ})$ — относительное индуктивное сопротивление элемента расчетной схемы, приведенное к номинальным условиям.

Расчетное выражение для вычисления максимальной мощности к. з. можно получить, умножив правую и левую части полученного соотношения (63) на $\sqrt{3} U_{\text{НОМ}}$:

$$S_{\text{max}}^{(3)} = \frac{100}{x_{*}(\text{НОМ}) \% } S_{\text{НОМ}},$$

где $S_{\text{НОМ}}$ — номинальная мощность.

Пример 13. Определить ток трехфазного к. з. на выводах генератора. $S_{\text{НОМ}} = 15 \text{ МВ} \cdot \text{А}$; $x_{d*}'' = 0,114$; $U_{\text{НОМ}} = 6,3 \text{ кВ}$; $E'' = 1,07 U_{\text{НОМ}}$.

Принимаем за базовые величины номинальные параметры генератора: $S_6 = S_{\text{НОМ}} = 15 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ и $U_6 = U_{\text{НОМ}} = 6,3 \text{ кВ}$.

Номинальный ток генератора

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{15\,000}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 1380 \text{ А} = I_6.$$

Пользуясь (58), получим:

$$I^{(3)} = \frac{1,07}{0,114} 1380 = 12\,950 \text{ А}.$$

Пример 14. Определить максимально возможный ток за трансформатором. $S_{\text{НОМ}} = 40 \text{ МВ} \cdot \text{А}$; $U_I = 115 \text{ кВ}$; $U_{II} = 6,3 \text{ кВ}$; $u_{\text{к}} = 10,5 \%$.

Номинальный ток обмотки 6,3 кВ трансформатора

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{40\,000}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 3670 \text{ А}.$$

Искомое значение тока к. з. определится по (63):

$$I_{\text{max}}^{(3)} = \frac{100}{10,5} 3670 = 35\,000 \text{ А}.$$

Пример 15. Составить схему замещения сети и определить ток трехфазного к. з. на генераторном напряжении 6,3 кВ электростанции А (рис. 16, а).

Номинальные напряжения элементов расчетной схемы принимаем равными средним напряжениям ступеней трансформации.

В качестве базовых величин выбираем $S_6 = 100$ МВ·А и $U_6 = 6,3$ кВ. Отсюда базовый ток на ступени 6,3 кВ

$$I_6 = \frac{100\,000}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 9160 \text{ А.}$$

Производим нумерацию элементов схемы замещения (рис. 16, в) и находим их сопротивления:

для энергосистемы по (61) и (19)

$$x_{*1} = \frac{9,16 \cdot 6,3}{7,5 \cdot 115} = 0,0669;$$

для ВЛ 110 кВ базовое напряжение, приведенное к ступени 115 кВ, по (18)

$$\overset{\circ}{U}_6 = 6,3 \frac{115}{6,3} = 115 \text{ кВ,}$$

на основании (36), используя $\overset{\circ}{U}_6$, и в соответствии с § 8

$$x_{*2} = 25 \cdot 0,4 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,0756;$$

для трансформатора 40 МВ·А по выражению (43)

$$x_{*3} = 0,105 \frac{100}{40} = 0,262;$$

для генератора 30 МВт, исходя из (43),

$$x_{*4} = 0,143 \frac{100}{37,5} = 0,381.$$

Аналогично расчету в именованных единицах (см. пример 5) ток в месте повреждения находим как сумму токов, приходящих от энергосистемы и от генератора.

Питание от энергосистемы. Результирующее сопротивление цепи к. з. по (22)

$$x_{*\Sigma} = 0,0669 + 0,0756 + 0,262 = 0,4045.$$

Ток к. з., приходящий в точке К, по (60)

$$I_{6,3}^{(3)} = \frac{1}{0,4045} \cdot 9160 = 22\,700 \text{ А.}$$

Питание от генератора. Ток к. з. по (58)

$$I_{6,3}^{(3)} = \frac{1,086}{0,381} \cdot 9160 = 26\,200 \text{ А.}$$

Суммарный ток в месте повреждения

$$I_{\Sigma 6,3}^{(3)} = 22\,700 + 26\,200 = 48\,900 \text{ А.}$$

Пример 16. Определить токи трехфазного к. з. на шинах 10,5 кВ п/ст. А, шинах 10,5 и 0,4 кВ п/ст. Б и шинах 10,5 кВ п/ст. В (рис. 17, а). В качестве базовых величин выбираем $S_6 = 100 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ и $U_6 = 10,5 \text{ кВ}$, откуда

$$I_6 = \frac{100\,000}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 5500 \text{ А.}$$

Находим сопротивления элементов расчетной схемы. Энергосистема а. В соответствии с (61) и (19)

$$x_{*1} = \frac{5500 \cdot 10,5}{9000 \cdot 37} = 0,173.$$

Трансформатор 6300 кВ·А п/ст. А. Приведем относительное номинальное сопротивление к базовым условиям на основании (43):

$$x_{*2} = x_{*3} = 0,07 \frac{100}{6,3} = 1,11.$$

Трансформатор 630 кВ·А п/ст. Б

$$x_{*6} = 0,055 \frac{100}{0,63} = 8,72.$$

Линии 10 кВ (кабель с алюминиевыми жилами и ВЛ с алюминиевыми проводами). В соответствии с § 8 и по (31)

$$x_{*4} = 0,08 \cdot 0,5 \frac{100}{10,5^2} = 0,0363;$$

$$r_{*4} = 0,45 \cdot 0,5 \frac{100}{10,5^2} = 0,204;$$

$$x_{*5} = 0,4 \cdot 2,8 \frac{100}{10,5^2} = 1,015;$$

$$r_{*5} = 0,33 \cdot 2,8 \frac{100}{10,5^2} = 0,837.$$

ВЛ (со стальными проводами). По табл. 3 внутреннее индуктивное сопротивление провода ПС-25 на 1 км длины равно $x'' = 1,4$ Ом/км, активное $r = 6,2$ Ом/км, в результате

$$x_{*7} = (0,4 + 1,4) \cdot 1,5 \frac{100}{10,5^2} = 2,44;$$

$$r_{*7} = 6,2 \cdot 1,5 \frac{100}{10,5^2} = 8,43.$$

Определяем ток трехфазного к. з.

Короткое замыкание в точке К-1. Результирующее сопротивление цепи к. з. по (22) и (23)

$$x_{*\Sigma} = 0,173 + \frac{1,11}{2} = 0,728.$$

Ток к. з. в точке К-1 по (60)

$$I_{10,5}^{(3)} = \frac{5500}{0,728} = 7550 \text{ А.}$$

Короткое замыкание в точке К-2. Результирующее индуктивное сопротивление цепи к. з.

$$x_{*\Sigma} = 0,173 + \frac{1,11}{2} + 0,0363 + 1,015 \approx 1,78.$$

Результирующее активное сопротивление цепи к. з.

$$r_{*\Sigma} = 0,204 + 0,837 \approx 1,04.$$

Поскольку $r_{*\Sigma} > \frac{1}{3} x_{*\Sigma}$, производим учет активного сопротивления.

Полное результирующее сопротивление

$$z_{*\Sigma} = \sqrt{1,04^2 + 1,78^2} = 2,06.$$

Ток к. з. в точке К-2 по (59)

$$I_{10,5}^{(3)} = \frac{1}{2,06} 5500 = 2670 \text{ А.}$$

Короткое замыкание в точке К-3. В точке К-3, как и в точке К-2, также необходим учет активного сопротивления.

Результирующее индуктивное сопротивление цепи к. з. с учетом сопротивления, определенного для точки к. з. К-2,

$$x_{*\Sigma} = 1,78 + 2,44 = 4,22.$$

Результирующее активное сопротивление цепи к. з. с учетом сопротивления, полученного для точки к. з. К-2,

$$r_{*\Sigma} = 1,04 + 8,43 = 9,47.$$

Полное результирующее сопротивление

$$z_{*\Sigma} = \sqrt{9,47^2 + 4,22^2} = 10,35.$$

Ток к. з. в точке К-3

$$I_{10,5}^{(3)} = \frac{1}{10,35} 5500 = 530 \text{ А.}$$

Короткое замыкание в точке К-4. Результирующее сопротивление цепи к. з. с использованием сопротивления до точки К-2

$$x_{*\Sigma} = 1,78 + 8,72 = 10,5.$$

Активное сопротивление не учитываем, поскольку

$$r_{*\Sigma} < \frac{1}{3} x_{*\Sigma}.$$

Ток к. з. в точке К-4, приведенный к стороне высшего напряжения 10,5 кВ трансформатора п/ст. Б,

$$I_{10,5}^{(3)} = \frac{1}{10,5} 5500 = 524 \text{ А.}$$

Пример 17. Определить токи трехфазного к. з. на шинах 37 и 6,3 кВ п/ст. А, шинах 6,3 кВ п/ст. Б и шинах 6,3 и 0,4 кВ п/ст. В (рис. 18, а).

Выбираем базовые величины $S_6 = 100 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $U_6 = 115 \text{ кВ}$ и как производную величину

$$I_6 = \frac{100\,000}{\sqrt{3 \cdot 115}} = 502 \text{ А,}$$

затем рассчитываем сопротивления.

Энергосистема. Исходя из (61)

$$x_{*1} = \frac{502}{8700} = 0,0576.$$

ВЛ 110 кВ. На основании (31)

$$x_{*2} = 12 \cdot 0,4 \frac{100}{115^2} = 0,0363.$$

ВЛ 35 кВ. Пересчитав базовое напряжение $U_6 = 115 \text{ кВ}$ по (32) к ступени 37 кВ, получим $U_6^0 = 37 \text{ кВ}$, после чего по (36) находим сопротивление ВЛ

$$x_{*5} = 0,4 \cdot 10 \frac{100}{37^2} = 0,292.$$

Кабельная линия 6 кВ. После приведения базового напряжения $U_6 = 115$ кВ к рассматриваемой ступени получим $\dot{U}_6 = 6,3$ кВ; поэтому

$$x_{*8} = 0,08 \cdot 2 \frac{100}{6,3^2} = 0,403,$$

$$r_{*8} = 0,33 \cdot 2 \frac{100}{6,3^2} = 1,66.$$

Трехобмоточный трансформатор п/ст. А. Приведем относительные номинальные сопротивления к базовым условиям по (43):

$$x_{*8,I} = x_{*4,I} = 0,11 \frac{100}{10} = 1,1;$$

$$x_{*3,II} = x_{*4,II} = 0,06 \frac{100}{10} = 0,6.$$

Двухобмоточный трансформатор п/ст. Б

$$x_{*6} = x_{*7} = 0,065 \frac{100}{1,6} = 4,06.$$

Двухобмоточный трансформатор п/ст. В

$$x_{*9} = 0,055 \frac{100}{0,4} = 13,75.$$

Короткое замыкание в точке К-1. Результирующее сопротивление цепи к. з.

$$x_{*\Sigma} = 0,0576 + 0,0363 + \frac{1,1 + 0,6}{2} = 0,944.$$

Базовый ток на ступени 37 кВ по (33)

$$I_6 = \frac{100\,000}{\sqrt{3} \cdot 37} = 1560 \text{ А.}$$

Ток к. з. в точке К-1 по (60)

$$I_{37}^{(3)} = \frac{1}{0,944} 1560 = 1650 \text{ А.}$$

Короткое замыкание в точке К-2. Суммарное сопротивление трехобмоточных трансформаторов

$$x_{*3;4} = 1,1 // (1,1 + 2 \cdot 0,6) = 0,745.$$

Результирующее сопротивление цепи к. з.

$$x_{*\Sigma} = 0,0576 + 0,0363 + 0,745 = 0,839.$$

Базовый ток на ступени 6,3 кВ

$$I_6 = \frac{100\,000}{\sqrt{3 \cdot 6,3}} = 9160 \text{ А.}$$

Ток к. з. в точке К-2

$$I_{6,3}^{(3)} = \frac{1}{0,839} \cdot 9160 = 10\,900 \text{ А.}$$

Короткое замыкание в точке К-3. Результирующее сопротивление цепи к. з. с использованием ранее определенного сопротивления для точки К-1

$$x_{*\Sigma} = 0,944 + 0,292 + \frac{4,06}{2} \approx 3,27.$$

Ток к. з. в точке К-3

$$I_{6,3}^{(3)} = \frac{1}{3,27} \cdot 9160 = 2800 \text{ А.}$$

Короткое замыкание в точке К-4. Результирующее индуктивное сопротивление цепи к. з. с использованием сопротивления до точки К-2

$$x_{*\Sigma} = 0,839 + 0,403 \approx 1,24.$$

Активное сопротивление цепи к. з. $r_{*\Sigma} = 1,66$.

Учет активного сопротивления при к. з. в точке К-4 необходим;

так как $r_{*\Sigma} > \frac{1}{3} x_{*\Sigma}$.

Полное результирующее сопротивление цепи к. з.

$$z_{*\Sigma} = \sqrt{1,66^2 + 1,24^2} = 2,07.$$

Ток к. з. в точке К-4 по (59)

$$I_{6,3}^{(3)} = \frac{1}{2,07} \cdot 9160 = 4420 \text{ А.}$$

Короткое замыкание в точке К-5. При к.з. в точке К-5 учитывать активное сопротивление цепи не требуется.

Результирующее сопротивление цепи к. з. с учетом сопротивления до точки К-4

$$x_{*\Sigma} = 1,24 + 13,75 = 14,99.$$

Ток в точке К-5, приведенный к первичному напряжению 6,3 кВ трансформатора п/ст. В

$$I_{6,3}^{(3)} = \frac{1}{14,99} \cdot 9160 = 611 \text{ А.}$$

10. ВЫЧИСЛЕНИЕ УДАРНОГО ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

При расчетах токов трехфазного к.з. для выбора аппаратов и проводников принято считать, что максимальное мгновенное значение тока к.з., или ударный ток, наступает через 0,01 с с момента возникновения короткого замыкания.

Для схем с последовательно включенными элементами ударный ток подсчитывается на основании (4) по выражению

$$i_{уд}^{(3)} = \sqrt{2} I_{п,0}^{(3)} \left(1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}} \right) = \sqrt{2} I_{п,0}^{(3)} k_{уд}, \quad (64)$$

где T_a — постоянная времени затухания апериодической составляющей тока к.з.; $k_{уд}$ — ударный коэффициент для времени $t=0,01$ с.

Постоянная времени T_a в (64) определяется в соответствии с (3):

$$T_a = \frac{x_{\Sigma}}{\omega r_{\Sigma}}, \quad (65)$$

где x_{Σ} и r_{Σ} — соответственно суммарное индуктивное и активное сопротивления схемы от источника питания до места к.з.

При составлении расчетной схемы для определения T_a необходимо учитывать, что синхронные машины вводятся в схему индуктивным сопротивлением обратной последовательности x_2 и активным сопротивлением статора r_s .

Для разветвленной схемы ударный ток к.з. вычисляется по

$$i_{уд}^{(3)} = \sqrt{2} I_{п,0}^{(3)} \left(1 + e^{-\frac{0,01}{T_{a,э}}} \right), \quad (66)$$

где $T_{a,э}$ — эквивалентная постоянная времени затухания апериодической составляющей тока к.з.

Постоянная времени $T_{a,э}$ определяется как

$$T_{a,э} = \frac{x_{\Sigma} (r=0)}{\omega r_{\Sigma} (x=0)}, \quad (67)$$

где x_{Σ} и r_{Σ} — соответственно суммарное индуктивное и суммарное активное сопротивления, полученные из схемы замещения, составленной из индуктивных и активных сопротивлений, поочередным исключением из нее сначала всех активных, а затем всех индуктивных сопротивлений.

Так же, как в предыдущем случае, синхронные машины вводятся в расчетную схему индуктивным сопротивлением x_2 и активным r_8 .

Характерные соотношения x/r для элементов электрической системы приведены ниже:

Турбогенераторы мощностью:		x/r
до 100 МВт		15—85
100—500 МВт		100—140
Гидрогенераторы:		
с демпферными обмотками		40—60
без демпферных обмоток		60—90
Трансформаторы мощностью:		
5—30 МВ·А		7—17
60—500 МВ·А		20—50
Реакторы 6—10 кВ:		
до 1000 А		15—70
1500 А и выше		40—80
Воздушные линии		2—8
Трехжильные кабели 6—10 кВ с медными и алюминиевыми жилами сечением 3×95 — 3×185 мм ²		0,2—0,8

Ударный ток электродвигателя, как синхронного, так и асинхронного, определяется следующим образом:

$$i_{уд,д}^{(3)} = \sqrt{2} I_{п,0,д}^{(3)} k_{уд}, \quad (68)$$

где $k_{уд}$ — ударный коэффициент цепи двигателя.

Если сопротивление внешней цепи электродвигателя невелико $z_{вн} \leq (0,1 \div 0,2) x_d$ и его учитывать не требуется, $k_{уд}$ берется в готовом виде по данным [4]; если же внешнее сопротивление подлежит учету $k_{уд}$ следует определять аналитически по формулам [4].

Если расчетная схема в результате преобразования может быть представлена как две или несколько независимых генерирующих ветвей, ударный ток в месте к.з. определяется как сумма ударных токов этих ветвей.

11. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СЛАГАЮЩЕЙ ТОКА ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ДЛЯ МОМЕНТОВ ВРЕМЕНИ ДО 0,5 с

Известно, что при питании к.з. от энергосистемы в результате неизменности напряжения на шинах системы амплитуды периодической слагающей тока короткого замыкания во времени не изменяются и ее действующее значение в течение всего процесса к.з. также остается неизменным $I_{п,0}^{(3)} = I_{п,t}^{(3)} = I_{п,\infty}^{(3)}$.

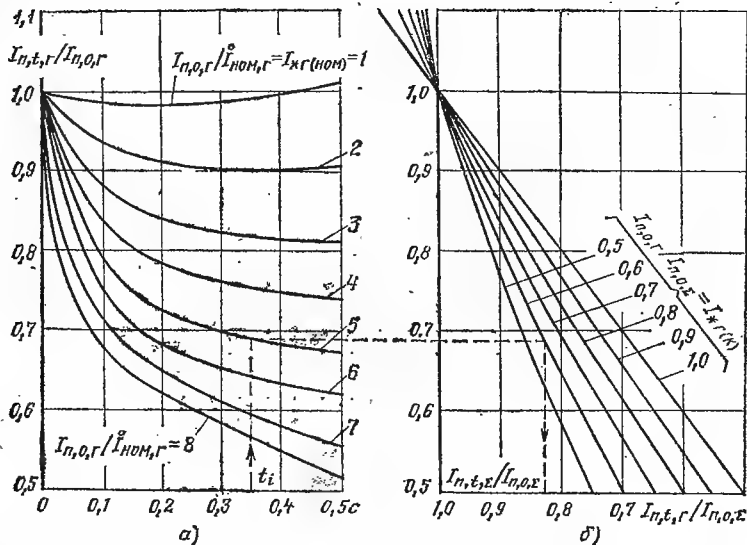


Рис. 24. Кривые изменения во времени тока к. з. синхронной машины при разных удаленностях точки к. з.

а — при питании к. з. от генератора; б — при питании к. з. от генератора и системы.

Следовательно, определение периодической слагающей в данном случае для любого момента времени к. з. должно производиться по тем же расчетным выражениям (51) и (52), которые приведены в § 9 для вычисления начального значения тока.

При питании к. з. от генератора с автоматическим регулятором возбуждения (АРВ) или без него амплитуды и действующее значение периодической слагающей в процессе к. з. изменяются по значению.

Для практических расчетов периодической слагающей в различные моменты к. з. обычно используют графоаналитический метод с применением расчетных кривых, иначе — метод расчетных кривых.

Расчетные типовые кривые рис. 24, а разработанные на кафедре электрических станций МЭИ, представляют собой зависимость от времени периодической слагающей тока трехфазного к. з. синхронной машины, отнесенной к начальному току к. з., при разных удаленностях точки короткого замыкания.

Удаленность фиксируется отношением

$$\frac{I_{п,0,г}}{I_{ном,г}} = I_{г(ном)} \quad (69)$$

или начальным относительным током к. з. генератора для заданной расчетной схемы.

Рассматриваемые кривые рис. 24, а являются унифицированными и построены для расчета токов к. з. от турбогенераторов, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов, независимо от типа, параметров и конструктивных особенностей машин.

Графоаналитический метод определения периодической слагающей тока генератора $I_{п,t,г}$ по кривым рис. 24, а применительно к одному источнику питания сводится к вычислению тока к. з. в начальный момент времени $I_{п,0,г}$, отношения полученного тока к номинальному току генератора, т. е. $I_{п,0,г}/I_{ном,г}$, и нахождению по кривым рис. 24, а на основании $I_{п,0,г}/I_{ном,г}$ относительного тока $I_{п,t,г}/I_{п,0,г}$ для времени t .

Искомый ток в месте к. з. определяется по найденному относительному току, как

$$I_{п,t,г} = \frac{I_{п,t,г}}{I_{п,0,г}} I_{п,0,г}.$$

Большое значение при вычислении токов по расчетным кривым имеет удаленность генератора от точки к. з.

Критерием удаленности, как уже отмечалось, служит отношение $I_{п,0,г}/I_{ном,г}$. Для семейства кривых рис. 24, а это отношение изменяется в пределах $I_{п,0,г}/I_{ном,г} = 1 \div 8$, что в пересчете на сопротивление в относительных номинальных единицах пропорционально*

$$x_{*(ном)расч} \equiv 0,125 \div 1.$$

* Ток от генератора, пользуясь относительными величинами,

можно выразить как $I_{п,0,г} = \frac{E_{*(ном)}}{x_{*(ном)расч}} I_{ном,г}$; отсюда $x_{*(ном)расч} =$

$$= \frac{I_{ном,г}}{I_{п,0,г}} E_{*(ном)}; \quad \text{приближенно считая} \quad E_{*(ном)} = \text{const},$$

$$x_{*(ном)расч} \equiv \frac{I_{ном,г}}{I_{п,0,г}}.$$

При различных удаленностях генерирующих источников создаваемые ими токи $I_{п,г}$ в зависимости от времени изменяются неодинаково, например:

для кривой $I_{п,г}/I_{ном,г}^{\square}=8^*$ относительный ток $I_{*г}=I_{п,г}/I_{п,г}$ изменяется в пределах $I_{*0}=1$; $I_{*0,2}=0,62$; $I_{*0,5}=0,52$, т. е. при $x_{*(ном)расч,min}$, соответствующем к. з. на выводах генератора, перепады токов особенно велики;

для кривой $I_{п,г}/I_{ном,г}^{\circ}=1$ диапазон изменения токов составляет $I_{*0}=1$; $I_{*0,2}=0,98$; $I_{*0,5}=1,01$, т. е. при $x_{*(ном)расч,max}$, соответствующем повреждению, намного более удаленному, чем к. з. за главным трансформатором станции, периодическая слагающая для всех моментов времени изменяется незначительно.

Следовательно, если в питании к. з. участвуют источники, существенно различающиеся по удаленности ($x_{*(ном)расч}$) от места к. з., расчет токов к. з. с применением кривых по результирующему сопротивлению схемы и суммарной мощности обобщенного источника может привести к недопустимым погрешностям. В подобных случаях определение токов необходимо производить с учетом удаленности генерирующих источников. Для этого путем преобразований схемы замещения из общего числа источников выделяются те источники или группы их, которые по своей удаленности находятся в резко несходных условиях с остальными по отношению к месту к. з.

В отдельную группу должны выделяться генераторы, непосредственно питающие к. з.*

Обособленно должна рассматриваться цепь энергосистемы.

Деление источников на группы должно выполняться таким образом, чтобы в результате оказалось не более двух-трех групп или генерирующих ветвей. Вычисление токов по расчетным кривым для каждой такой ветви производится отдельно исходя из отношения $I_{п,г}/I_{ном,г}^{\square}$ ветви. Выделение большего числа групп или ветвей на практике себя не оправдывает, так как усложняет расчет, не повышая, по существу, его точности.

Если имеется несколько однотипных генераторов, одинаково расположенных по отношению к месту к. з.,

* Для турбогенераторов небольшой мощности.

их целесообразно объединить в эквивалентный источник питания (генератор).

В случае действия совместно генератора (одного или нескольких) и энергосистемы генераторы, при значительной удаленности от места к. з., объединяются с энер-

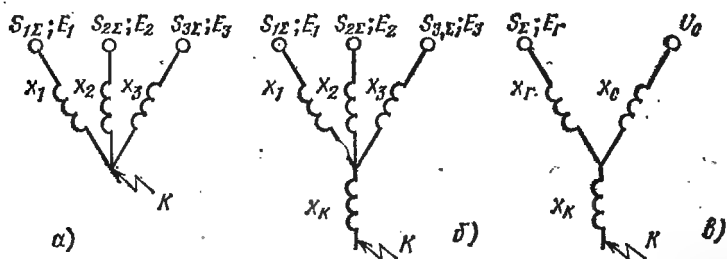


Рис. 25. Схемы различного включения источников питания.

а — при непосредственной связи с точкой к. з.; б, в — при питании к. з. через общее сопротивление в месте к. з.

госистемой, и расчет токов к. з. производится при напряжении энергосистемы.

Каждая из генерирующих ветвей может быть связана с точкой к. з. непосредственно (рис. 25, а) или через индуктивное сопротивление, общее для всех ветвей (рис. 25, б и в).

При непосредственной связи источников с местом к. з. вычисление токов в начальный момент времени производится в соответствии с § 9. По найденным значениям $I_{п,о,г}/I_{ном,г}^p$ с помощью кривых рис. 24, а определяют искомые токи $I_{п,t,г}$ для заданного момента времени t .

При наличии нескольких источников питания (генераторов и энергосистемы), соединенных с точкой к. з. через общее сопротивление, схема преобразуется и приводится к виду генератор — система (рис. 25, в); затем методом наложения или другими способами расчета токов при наличии разных э. д. с. определяют токи к. з. в начальный момент времени: ток от генератора $I_{п,о,г}$ и суммарный ток $I_{п,о,з}$.

Если отношение тока генератора к общему току в месте к. з. $I_{п,о,г}/I_{п,о,з} \geq 0,5$ определить ток в месте к. з. через время t можно путем совместного использования

$$\frac{I_{п,t,г}}{I_{п,0,г}} = f(t) \text{ и } \frac{I_{п,t,г}}{I_{п,0,г}} = f\left(\frac{I_{п,t,Σ}}{I_{п,0,Σ}}\right)$$

(рис. 24, а и б соответственно).

Графически это показано стрелками на рис. 24, а и б.

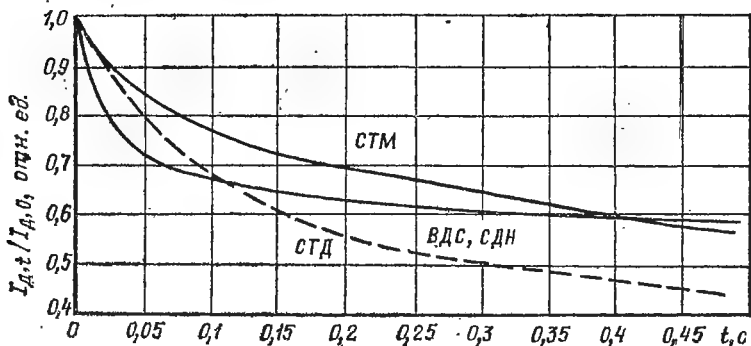


Рис. 26. Расчетные кривые для определения тока к. з. от синхронного двигателя.

Кривые рис. 24, б построены для разных значений отношения

$$\frac{I_{п,0,г}}{I_{п,0,Σ}} = I_{*г(κ)}. \quad (70)$$

Расчет токов с применением кривых рис. 24, а и б выполняется следующим образом:

вычисляются значения $I_{п,0,г}/I_{ном,г}$ и $I_{п,0,г}/I_{п,0,Σ}$. Для начального момента времени;

по кривой $I_{п,t,г}/I_{п,0,г} = f(t)$ (рис. 24, а) исходя из $I_{п,0,г}/I_{ном,г}$ для времени t определяется отношение (ордината) $I_{п,t,г}/I_{п,0,г}$ и по нему для соответствующей кривой на рис. 24, б $I_{п,0,г}/I_{п,0,Σ}$ находится $I_{п,t,Σ}/I_{п,0,Σ}$;

по $I_{п,t,Σ}/I_{п,0,Σ}$ и ранее найденному току $I_{п,0,Σ}$ определяется искомый ток $I_{п,t,Σ}$.

На абсциссе графика 24, б помимо $I_{п,t,Σ}/I_{п,0,Σ}$ можно также получить значение $I_{п,t,г}/I_{п,0,Σ}$, вычитая из $I_{п,t,Σ}/I_{п,0,Σ}$ отношение тока системы к суммарному току $I_{п,c}/I_{п,0,Σ}$.

Используя абсциссу рис. 24, б вместо ординаты рис. 24, а для работы одного генератора, когда $I_{п,0,r}/I_{п,0,\Sigma}=1$ и $I_{п,t,r}/I_{п,0,\Sigma}=I_{п,t,r}/I_{п,0,r,\Sigma}$, можно получить на ней относительные значения изменений во времени тока генератора.

Если отношение $I_{п,0,r}/I_{п,0,\Sigma} < 0,5$ (что означает достаточно большую удаленность к. з. для генератора или

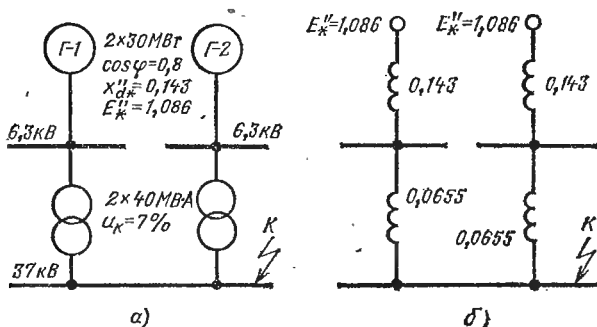


Рис. 27. Схемы к примеру 18.

а — расчетная схема сети; б — схема замещения.

сравнительно небольшую мощность источника), то генератор следует объединить с энергосистемой во избежание погрешностей при расчете тока к. з. от генератора.

При необходимости учесть подпитку к. з. синхронными электродвигателями напряжением выше 1000 В нужно пользоваться кривыми рис. 26, которые построены для синхронных двигателей разных типов.

Пример 18. Определить ток трехфазного к. з. на шинах 37 кВ электростанции (схема рис. 27, а) для момента времени $t=0,1$ с.

Сопротивления в схеме замещения указаны в относительных единицах на основании § 7 и 8 исходя из базовых условий $S_6 = 37,5 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ и $U_6 = 37 \text{ кВ}$. Номинальный ток генератора при напряжении 37 кВ, а также базовый ток

$$I_{\text{ном}} = I_6 = \frac{37 \cdot 500}{\sqrt{3} \cdot 37} = 585 \text{ А.}$$

Так как оба генератора расположены одинаково по отношению к месту к. з., рассматриваем их совместно.

Результирующее сопротивление схемы

$$x_{\Sigma} = \frac{0,143 + 0,0655}{2} = 0,10425.$$

Ток от генератора 2×30 МВт при трехфазном к. з. на шинах 37 кВ в начальный момент времени

$$I_{0,г,\Sigma}^{(3)} = \frac{1,086}{0,10425} \cdot 585 = 6100 \text{ А.}$$

Отношение тока обобщенного генератора при трехфазном к. з. к номинальному току по (69)

$$\frac{I_{0,г,\Sigma}^{(3)}}{I_{\text{ном},г,\Sigma}^0} = \frac{6100}{585 \cdot 2} = 5,21.$$

По кривым рис. 24, а находим:

$$\frac{I_{0,г,\Sigma}^{(3)}}{I_{0,г,\Sigma}^{(3)}} = 0,7825.$$

Определяем ток трехфазного к. з. от обобщенного генератора через 0,1 с:

$$I_{0,г,\Sigma}^{(3)} = 0,7825 \cdot 6100 = 4780 \text{ А.}$$

Пример 19. Определить токи трехфазного к. з. $I_{0,1}$ в точке К-1 и $I_{0,2}$ в точке К-2 схемы рис. 28, а*.

Сопротивления схемы замещения выражены в относительных единицах (см. § 7 и 8) и приведены к базовой мощности

$$S_0 = 450 \text{ МВ} \cdot \text{А.}$$

Номинальные токи генераторов ТЭЦ А (базовые токи) равны: при $U = 115 \text{ кВ}$

$$I_{\text{ном}}^0 = \frac{450}{\sqrt{3 \cdot 115}} = 2,26 \text{ кА;}$$

при $U = 6,3 \text{ кВ}$

$$I_{\text{ном}} = \frac{450}{\sqrt{3 \cdot 6,3}} = 41,2 \text{ кА.}$$

Короткое замыкание в точке К-1. Результирующее сопротивление схемы

$$x_{\Sigma} = \frac{0,8935 \cdot 1,76}{2,6535} = 0,593.$$

* Поскольку токи определяются только для трехфазного к. з., индекс (3) везде опущен.

Ток трехфазного к. з. от объединенного источника $S_{\text{ном}} = 525 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ в начальный момент времени

$$I_{0, \Gamma, \Sigma} = \frac{1,17}{0,593} \cdot 2,26 = 4,46 \text{ кА}.$$

Относительный номинальный ток от объединенного источника на базе (38)

$$I_{\text{ном}, \Gamma, \Sigma*} = \frac{525}{450} = 1,167*.$$

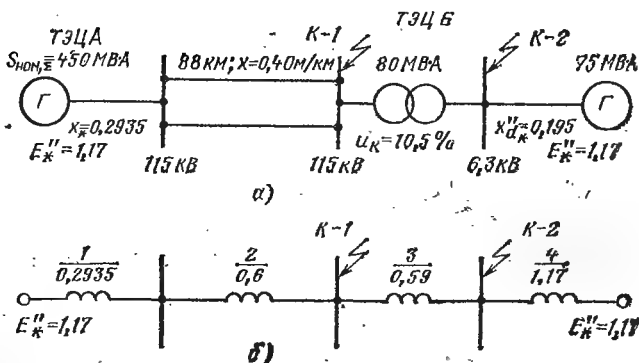


Рис. 28. Схемы к примеру 19.

а — расчетная схема сети; б — схема замещения.

Отношение тока к. з. объединенного источника к номинальному току по (69) применительно к расчету в относительных единицах:

$$\frac{I_{0, \Gamma, \Sigma*}}{I_{\text{ном}, \Gamma, \Sigma*}} = \frac{1,17}{0,593 \cdot 1,167} = 1,69.$$

Применяя кривые рис. 24, а, находим:

$$I_{0,1 \Gamma, \Sigma} / I_{0, \Gamma, \Sigma} = 0,953.$$

Ток к. з. от объединенного источника в точке К-1 через $t = 0,1 \text{ с}$ составит:

$$I_{0,1 \Sigma} = 0,953 \cdot 4,46 = 4,25 \text{ кА}.$$

Короткое замыкание в точке К-2. При к. з. в точке К-2 генератор 75 МВ·А ТЭЦ Б должен быть выделен, и поэтому оба источника рассматриваем независимо.

* Токи заменены мощностями.

Суммарное сопротивление ветви ТЭЦ А до точки к. з.

$$x_A = 0,2935 + 0,6 + 0,59 = 1,484.$$

Сопротивление генератора ТЭЦ Б

$$x_B = 1,17.$$

Токи трехфазного к. з. в точке К-2 в начальный момент времени от источников:

$$\text{ТЭЦ А: } I_{0,г,А} = \frac{1,17}{1,484} \cdot 41,2 = 32,5 \text{ кА};$$

$$\text{ТЭЦ Б: } I_{0,г,Б} = \frac{1,17}{1,17} \cdot 41,2 = 41,2 \text{ кА}.$$

Отношение тока трехфазного к. з. при $t=0$ к номинальному току по (69)

$$\text{ТЭЦ А: } \frac{I_{0,г,А*}}{I_{ном,г,А*}} = \frac{1,17}{1,484} = 0,788;$$

$$\text{ТЭЦ Б: } \frac{I_{0,г,Б*}}{I_{ном,г,Б*}} = \frac{1,17}{1,17 \cdot 0,167} = 6,$$

$$\text{где } I_{ном,г,А*} = \frac{450}{450} = 1^* \text{ и } I_{ном,г,Б*} = \frac{75}{450} = 0,167^*.$$

В связи с тем, что для ТЭЦ А короткое замыкание в точке К-2 является весьма удаленным с током к. з. менее номинального, а при таких удаленностях амплитуда переменной составляющей тока к. з. не изменяется, считаем:

$$I_{0,2г,А} = I_{0,г,А} = 32,5 \text{ кА}.$$

Для ТЭЦ Б по кривым рис. 24, а находим:

$$\frac{I_{0,2г,Б}}{I_{0,г,Б}} = 0,682.$$

Ток к. з. в точке К-2 для $t=0,2$ с равен:

$$I_{0,2\Sigma} = 32,5 + 0,682 \cdot 41,2 = 60,6 \text{ кА}.$$

Если в данном случае расчет произвести для объединенного источника,

$$x_{\Sigma} = 1,484 // 1,17 = 0,655.$$

Ток к. з. в начальный момент в точке К-2

$$I_{0,г,\Sigma} = \frac{1,17}{0,655} \cdot 41,2 = 73,7 \text{ кА}.$$

* Токи заменены мощностями.

Отношение тока к. з. к номинальному току

$$\frac{I_{0,г,Σ*}}{I_{ном,г,Σ*}} = \frac{1,17}{0,655 \cdot 1,167} = 1,53.$$

По кривым рис. 24, а находим: $\frac{I_{0,2г,Σ}}{I_{0,г,Σ}} = 0,944$ и определяем

искомый ток $I_{0,2г,Σ} = 0,944 \cdot 73,7 = 69,5$ кА.

Погрешность при этом для $t=0,2$ с равна:

$$\frac{69,5 - 60,6}{60,6} \cdot 100 = 14,7\%$$

т. е. значительна.

Пример 20. Вычислить ток трехфазного к. з. для $t=0,1$ с в точках К-2 и К-3 и для времени $t=0,2$ с в точке К-1 схемы рис. 29, а.

Сопротивления в схеме замещения рис. 29, б приведены к напряжению 115 кВ. Подсчет сопротивлений произведен на основании § 6 и 8.

Номинальный ток генератора 100 МВт, приведенный к напряжению 115 кВ, составляет:

$$I_{ном,г} = \frac{100 \cdot 10^3}{\sqrt{3 \cdot 115 \cdot 0,85}} = 590 \text{ А.}$$

Расчет токов к. з. в точках К-1 и К-2 для начального момента времени производим методом наложения.

Короткое замыкание в точке К-1. Результирующий ток от генератора 100 МВт (рис. 29, в, г) в начальный момент к. з. $t_k=0$

$$I_{0,г} = 1480 - 745 = 735 \text{ А.}$$

То же от энергосистемы

$$I_c = 1350 - 813 = 537 \text{ А.}$$

Ток в месте к. з.

$$I_{0,Σ} = 667 + 605 = 1272 \text{ А.}$$

Отношение тока генератора к суммарному току к. з.

$$\frac{I_{0,г}}{I_{0,Σ}} = \frac{735}{1272} \approx 0,58.$$

Отношение тока к. з. генератора к номинальному току $I_{ном,г}^0$ по (69)

$$\frac{I_{0,г}}{I_{ном,г}^0} = \frac{735}{590} = 1,25.$$

Для определения токов при $t_k=0,2$ с используем совместно кривые рис. 24, а и б. Вначале находим координаты точки на соответствующей кривой рис. 24, а по заданному времени и отношению $I_{0,Г}/I_{ном,Г}=1,25$, затем по кривым рис. 24, б по (70), исходя из $I_{0,Г}/I_{0,Σ}=0,58$ определяем изменение суммарного тока к. з. для $t=0,2$ с:

$$I_{0,2Σ}/I_{0,Σ} = 0,98.$$

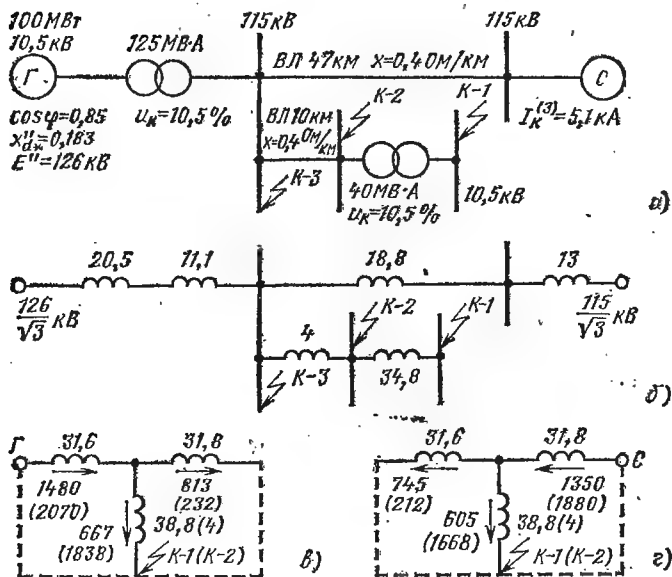


Рис. 29. Схемы к примеру 20.

а — расчетная схема сети; б — схема замещения; в, е — схемы токораспределения условных режимов при к. з. в точках K_1 и K_2 ($t_k=0$).

Суммарный ток к. з. в точке $K-1$, приведенный к напряжению 115 кВ,

$$I_{0,2Σ115} = 0,98 \cdot 1272 = 1247 \text{ А.}$$

То же на напряжении 10,5 кВ:

$$I_{0,2Σ10,5} = 1,247 \frac{115}{10,5} \approx 13,7 \text{ кА.}$$

Короткое замыкание в точке К-2. Результирующий ток от генератора 100 МВт в начальный момент к. з. для $t_k=0$ (рис. 29, в, з)

$$I_{0,Г} = 2070 - 212 = 1858 \text{ А.}$$

То же от энергосистемы:

$$I_c = 1880 - 232 = 1648 \text{ А.}$$

Ток в месте к. з.

$$I_{0,Σ} = 1838 + 1668 = 3506 \text{ А.}$$

Отношение тока к. з. генератора к току $I_{ном,Г}$ по (69)

$$\frac{I_{0,Г}}{I_{ном,Г}} = \frac{1858}{590} = 3,15.$$

Определение спада тока через 0,1 с: по отношению $I_{0,Г}/I_{ном,Г} = 3,15$ для $t=0,1$ с на кривой рис. 24, а определяем ординату $I_{0,1,Г}/I_{0,Г}$ и по ней для кривой рис. 24, б $I_{0,Г}/I_{0,Σ} = 1858/3506 = 0,53$ находим суммарный ток к. з. в точке К-2:

$$\frac{I_{0,1Σ}}{I_{0,Σ}} = 0,942, \text{ откуда } I_{0,1Σ} = 0,942 \cdot 3506 = 3300 \text{ А.}$$

Короткое замыкание в точке К-3. Токи к. з. в момент времени $t_k=0$:

$$\text{генератора } I_{0,Г} = 2300 \text{ А.}$$

$$\text{системы } I_c = 2090 \text{ А.}$$

$$\text{Отношение } \frac{I_{0,Г}}{I_{ном,Г}} = \frac{2300}{590} = 3,9.$$

Определение токов к. з. через $t=0,1$ с производим по кривым рис. 24, а:

$$\frac{I_{0,1Г}}{I_{0,Г}} = 0,8375, \text{ откуда } I_{0,1Г} = 0,8375 \cdot 2300 = 1930 \text{ А.}$$

Ток в месте к. з.

$$I_{0,1Σ} = I_{0,1Г} + I_c = 1930 + 2090 = 4020 \text{ А.}$$

Пример 21. Определить ток трехфазного к. з. через 0,1 с в точке К схемы (рис. 30, а).

Сопровращения в схеме замещения рис. 30, б выражены в омах и приведены к напряжению базовой ступени $U_6 = 37 \text{ кВ}$.

Оба генерирующих источника — энергосистему и электродвигатели — рассматриваем самостоятельно.

Сопротивления непосредственной связи источников с точкой к. з. x_6 и x_7 вычисляем как стороны эквивалентного треугольника по (25), определив перед тем сопротивления схемы до точки объединения ветвей:

$$x_{c-0} = 1,855 + 7,2 = 9,055 \text{ Ом};$$

$$x_{д-0} = 54,7 + 6 = 60,7 \text{ Ом};$$

$$x_6 = 2 + 9,055 + \frac{2 \cdot 9,055}{60,7} = 11,35 \text{ Ом};$$

$$x_7 = 60,7 + 2 + \frac{60,7 \cdot 2}{9,055} = 76,1 \text{ Ом}.$$

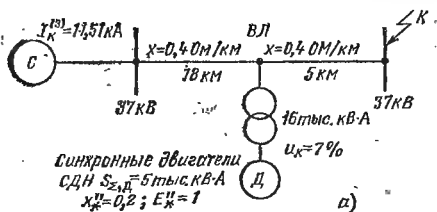
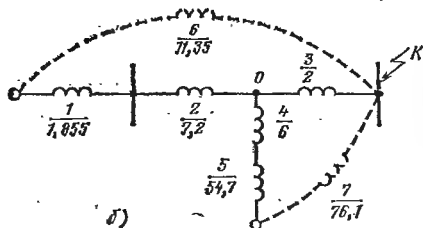


Рис. 30 Схемы к примеру 21.

а — расчетная схема сети; б — схема замещения.



За неимением данных условно принимаем, что система является мощным энергетическим объединением. Тогда при сопротивлении ветви $x_6 = 11,35$ Ом ток к. з., создаваемый энергосистемой в точке К,

$$I_c = \frac{37}{\sqrt{3 \cdot 11,35}} = 1,88 \text{ кА}.$$

Для синхронных электродвигателей типа СДН сначала определяем ток в момент времени $t=0$, по кривым рис. 26—соотношение токов для времени $t=0,1$ с, затем, исходя из найденных значений, вычисляем ток в точке К для $t=0,1$ с:

$$I_{0,д} = \frac{37}{\sqrt{3 \cdot 76,1}} = 0,281 \text{ кА}; \quad \frac{I_{0,1д}}{I_{0,д}} = 0,675;$$

$$I_{0,1д} = 0,675 \cdot 0,281 = 0,19 \text{ кА}.$$

Искомый ток в точке К составит:

$$I_{0,1\Sigma} = 1,88 + 0,19 = 2,07 \text{ кА}.$$

12. ОБЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

К несимметричным к. з. относятся двухфазное, двухфазное на землю и однофазное к. з. (рис. 1, б—г).

Для несимметричных к. з. характерны неодинаковые значения фазных токов и напряжений и различные углы сдвига между токами, а также между токами и соответствующими напряжениями.

Эта особенность несимметричных к. з. существенно усложняет их расчет. Действительно, при расчетах трехфазных к. з. мы исходили из предположения полной симметрии трех фаз рассматриваемой схемы, что позволяло составлять схему замещения и вести расчет для одной из фаз.

Поскольку при несимметричных к. з. токи и напряжения в разных фазах различны, для выполнения расчета обычным способом потребовалось бы составлять схему замещения для всех трех фаз рассматриваемой сети с учетом взаимоиндукции между фазами. Это чрезвычайно усложнило бы расчет даже в случае сравнительно простых схем.

Для упрощения расчетов несимметричных к. з. предложен метод симметричных составляющих, сущность которого состоит в замене несимметричного режима трехфазной сети симметричным режимом или замене несимметричного повреждения условным трехфазным коротким замыканием.

По этому методу любая несимметричная трехфазная система может быть однозначно разложена на три симметричные системы, или последовательности — прямую, обратную и нулевую:

$$\dot{N}_A = \dot{N}_{A1} + \dot{N}_{A2} + \dot{N}_{A0}^* \quad (71)$$

$$\dot{N}_B = \dot{N}_{B1} + \dot{N}_{B2} + \dot{N}_{B0}^* \quad (72)$$

$$\dot{N}_C = \dot{N}_{C1} + \dot{N}_{C2} + \dot{N}_{C0}^* \quad (73)$$

Понятие о векторах и теории комплексных чисел. При расчете коротких замыканий, анализе электрических схем необходимо сопоставлять различные токи, напряжения и т. п., складывать или вычитать их, определять углы

* Точка над буквой означает, что данная величина изменяется по синусоидальному закону.

между ними и т. д. Пользоваться в этом случае синусоидами, подобными приведенной на рис. 31, неудобно, поскольку построение кривых тока и напряжения занимает много времени и не дает простого и наглядного результата. Поэтому для упрощения принято изображать токи и напряжения в виде отрезков прямых линий, имеющих определенную длину и направление, так называемых **векторов**.

Модуль или длина вектора в принятом масштабе соответствует амплитудному значению изображаемой величины, например I_m , U_m и т. д.

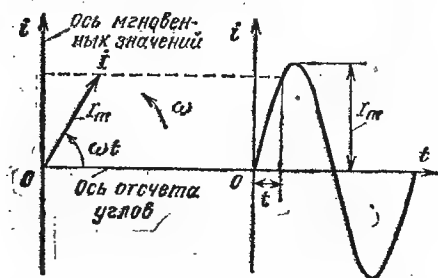


Рис. 31. Векторное изображение синусоидального тока $i = I_m \sin \omega t = \dot{I}$.



Рис. 32. Векторное изображение комплексного числа $a + jb$.

Аргумент или угол поворота вектора относительно оси отсчета углов $\varphi = \omega t = 2\pi f t$ соответствует моменту времени t на графике синусоиды, построенной в координатах i, t для тока, координатах u, t для напряжения и т. п. Проекции вектора на ось, перпендикулярную оси отсчета углов, дают мгновенные значения электрической величины (рис. 31).

Векторные диаграммы синусоидально изменяющихся величин — магнитных потоков, напряжений, токов и т. п. — наглядно показывают, каковы соотношения между ними по значению и по фазе, и значительно облегчают понимание режимов в цепях переменного тока. Но в связи с тем, что при графических способах точность не всегда достаточна и графические построения сложны для разветвленных цепей, для расчетов числовых значений электрических величин в большинстве случаев применяются аналитические способы вычислений: так, в частно-

сти, в методе симметричных составляющих используется теория комплексов, или комплексных чисел.

Комплексные числа позволяют выражать электрические величины как в виде векторов, так и аналитически: в алгебраической, тригонометрической и показательной формах, а также легко переходить от одной формы изображения к другой.

Комплексное число представляет собой сумму чисел $a + \sqrt{-1}b = a + jb$, где a и b являются действительными числами, $j = \sqrt{-1}$ называют мнимой единицей. Из условия $j = \sqrt{-1}$ вытекает основное свойство комплексного числа: $j^2 = -1$.

Комплексное число $a + jb$ можно представить в виде вектора с модулем $r = \sqrt{a^2 + b^2}$ и углом поворота, или аргументом, φ , который характеризуется $\operatorname{tg} \varphi = b/a$ (рис. 32).

При этом число a называется абсциссой комплексного числа и откладывается по оси действительных значений, число b — ординатой и откладывается по оси мнимых значений.

Чтобы произвести суммирование комплексных чисел, следует сложить в отдельности их действительные и мнимые части; следовательно, сумма комплексов $a + jb$ и $a_1 + jb_1$ выразится как $(a + jb) + (a_1 + jb_1) = (a + a_1) + j(b + b_1)$.

При умножении комплексов используется алгебраическое правило умножения многочленов. Таким образом, произведение тех же двух комплексов $a + jb$ и $a_1 + jb_1$ будет равно:

$$(a + jb)(a_1 + jb_1) = (aa_1 - bb_1) + j(ab_1 + a_1b).$$

В тригонометрической форме комплексное число выражается через модуль r и аргумент комплекса φ :

$$a = r \cos \varphi \text{ и } b = r \sin \varphi;$$

$$a + jb = r(\cos \varphi + j \sin \varphi).$$

Показательная форма комплексного числа определяется выражением $\cos \varphi + j \sin \varphi = e^{j\varphi}$. Из приведенного равенства следует, что $a + jb = re^{j\varphi}$. Множитель $e^{j\varphi}$ определяет угол поворота вектора с модулем r относительно оси действительных величин.

Если комплексы выражены в тригонометрической или показательной форме

$$a + jb = r(\cos \varphi + j \sin \varphi) = re^{j\varphi}$$

и

$$a_1 + jb_1 = r_1(\cos \varphi_1 + j \sin \varphi_1) = r_1 e^{j\varphi_1},$$

то при умножении модули их перемножаются, а аргументы складываются, т. е.

$$r(\cos \varphi + j \sin \varphi) r_1(\cos \varphi_1 + j \sin \varphi_1) = rr_1[\cos(\varphi + \varphi_1) + j \sin(\varphi + \varphi_1)]$$

и

$$re^{j\varphi} r_1 e^{j\varphi_1} = rr_1 e^{j(\varphi + \varphi_1)}.$$

В частном случае умножение комплексa, представленного в виде вектора, на величину $\cos \varphi + j \sin \varphi = e^{j\varphi}$ равносильно повороту вектора на угол φ в сторону положительного отсчета углов; умножение того же вектора на так называемый сопряженный комплекс $\cos \varphi - j \sin \varphi = e^{-j\varphi}$ соответствует повороту вектора на угол φ в обратном направлении; например, если дан вектор $re^{j\varphi}$, то в показательной форме умножение его на $e^{\pm j\varphi}$ записывается как

$$re^{j\varphi} e^{j\psi} = re^{j(\varphi + \psi)} \quad \text{и} \quad re^{j\varphi} e^{-j\psi} = re^{j(\varphi - \psi)}.$$

В заключение укажем, что изображение синусоидально изменяющейся величины, например тока в комплексной форме, выглядит следующим образом; $\dot{I} = I_m(\cos \omega t + j \sin \omega t)$. Мгновенное значение тока $i = I_m \sin \omega t$ равняется мнимой части комплекса без множителя j или проекции вектора $\dot{I}$, вращающегося со скоростью ω , на ось мнимых значений также без множителя j .

Метод симметричных составляющих. Выше уже говорилось, что метод симметричных составляющих состоит в замене любой, несимметричной системы суммой трех симметричных систем или последовательностей: прямой, обратной и нулевой [см. (71) — (73)].

Векторы системы прямой последовательности равны по значению и сдвинуты относительно друг друга на 120° в направлении прямого чередования фаз A, B, C . Векторы системы обратной последовательности имеют равные значения и сдвинуты на 120° в направлении обратного чередования фаз A, C, B . Векторы системы нулевой последовательности совпадают по направлению и одинаковы по значению.

Пользуясь методом комплексных чисел, можно, приняв одну из фаз за основную, остальные симметричные составляющие выразить через векторы этой фазы. Так, если принять за основную фазу A , то векторы в уравнениях (72) и (73) определяются как

$$\dot{N}_{B1} = \dot{N}_{A1} e^{j240^\circ}, \quad \dot{N}_{B2} = \dot{N}_{A2} e^{j120^\circ}, \quad \dot{N}_{B0} = \dot{N}_{A0}; \quad (74)$$

$$\dot{N}_{C1} = \dot{N}_{A1} e^{j120^\circ}, \quad \dot{N}_{C2} = \dot{N}_{A2} e^{j240^\circ}, \quad \dot{N}_{C0} = \dot{N}_{A0}. \quad (75)$$

Комплекс e^{j120° называется фазным множителем, или оператором, и для сокращения математической записи обозначается буквой a . Оператор a позволяет выражать векторы симметричной системы через вектор какой-либо одной фазы. Умножение вектора на оператор a означает поворот вектора на 120° в положительном направлении, т. е. против часовой стрелки, умножение на a^2 — поворот на 240° в том же направлении.

Таким образом, с помощью фазного множителя a соотношения (74) и (75) можно записать следующим образом:

$$\dot{N}_{B1} = a^2 \dot{N}_{A1}, \quad \dot{N}_{B2} = a \dot{N}_{A2}, \quad \dot{N}_{B0} = \dot{N}_{A0}; \quad (74a)$$

$$\dot{N}_{C1} = a \dot{N}_{A1}, \quad \dot{N}_{C2} = a^2 \dot{N}_{A2}, \quad \dot{N}_{C0} = \dot{N}_{A0}, \quad (75a)$$

$$\text{где } a = e^{j120^\circ} = \cos 120^\circ + j \sin 120^\circ = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2};$$

$$a^2 = e^{j240^\circ} = \cos 240^\circ + j \sin 240^\circ = -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Подставляя соотношения (74a) и (75a) в (72) и (73), получим:

$$\dot{N}_B = a^2 \dot{N}_{A1} + a \dot{N}_{A2} + \dot{N}_{A0}; \quad (76)$$

$$\dot{N}_C = a \dot{N}_{A1} + a^2 \dot{N}_{A2} + \dot{N}_{A0}. \quad (77)$$

Решая совместно (71), (76) и (77), определим значения составляющих $\dot{N}_{A1}$, $\dot{N}_{A2}$ и $\dot{N}_{A0}$ через векторы фазных величин $\dot{N}_A$, $\dot{N}_B$ и $\dot{N}_C$:

$$\dot{N}_{A1} = \frac{1}{3} (\dot{N}_A + a \dot{N}_B + a^2 \dot{N}_C); \quad (78)$$

$$\dot{N}_{A2} = \frac{1}{3} (\dot{N}_A + a^2 \dot{N}_B + a \dot{N}_C); \quad (79)$$

$$\dot{N}_{A0} = \frac{1}{3} (\dot{N}_A + \dot{N}_B + \dot{N}_C). \quad (80)$$

На рис. 33, *а* графически определены составляющие $\dot{I}_{A1}$, $\dot{I}_{A2}$ и $\dot{I}_{A0}$ системы токов $\dot{I}_A$, $\dot{I}_B$, $\dot{I}_C$ в соответствии с (78) — (80) и затем по найденным векторам снова получены исходные фазные токи $\dot{I}_A$, $\dot{I}_B$, $\dot{I}_C$ (рис. 33, *б*).

Системы прямой и обратной последовательности симметричны. И поскольку векторы той и другой системы в сумме равны нулю, эти системы одновременно являются уравновешенными:

$$\dot{N}_{A1} + \dot{N}_{B1} + \dot{N}_{C1} = \dot{N}_{A1}(1 + a^2 + a) = 0;$$

$$\dot{N}_{A2} + \dot{N}_{B2} + \dot{N}_{C2} = \dot{N}_{A2}(1 + a + a^2) = 0,$$

где

$$1 + a + a^2 = 1 - \frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = 0,$$

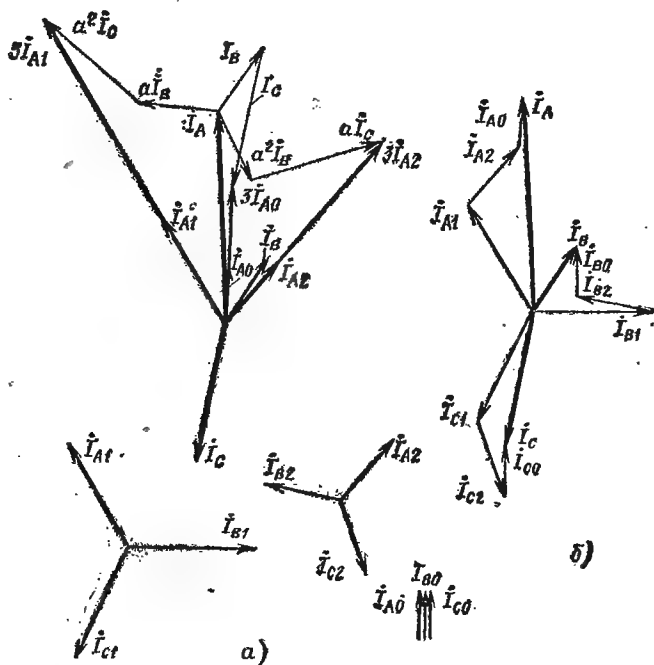


Рис. 33. Разложение несимметричной трехфазной системы на симметричные составляющие (а); суммирование составляющих для получения исходной схемы (б).

Система нулевой последовательности симметрична, но не уравновешена:

$$\dot{N}_{A0} + \dot{N}_{B0} + \dot{N}_{C0} = 3\dot{N}_{A0} \neq 0.$$

Следовательно, векторы любой неуравновешенной трехфазной системы величин в сумме равны утроенной слагающей нулевой последовательности на основании (80):

$$\dot{N}_A + \dot{N}_B + \dot{N}_C = 3\dot{N}_{A0}.$$

Теория симметричных составляющих позволяет рассматривать режим к. з. по отдельным последовательностям для одной фазы, так как системы фаз симметричны.

Для каждого участка или элемента расчетной схемы в соответствии с законом Ома можно написать:

$$\Delta \dot{U}_1 = \dot{I}_1 j x_1;$$

$$\Delta \dot{U}_2 = \dot{I}_2 j x_2;$$

$$\Delta \dot{U}_0 = \dot{I}_0 j x_0,$$

где x_1 , x_2 и x_0 — сопротивления элемента при прохождении токов соответствующих последовательностей или сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательности.

В тригонометрической и показательной формах j можно выразить как $j = \cos 90^\circ + j \sin 90^\circ = e^{j90^\circ}$.

Умножение вектора тока на j или e^{j90° соответствует повороту его на 90° против часовой стрелки и означает, что напряжение в индуктивной цепи опережает ток на 90° .

Напряжение в месте к. з. при несимметричном к. з. не равно нулю; как при трехфазном металлическом к. з., и определяется для последовательностей при помощи следующих уравнений:

$$\dot{U}_{k,1} = \dot{E} - \dot{I}_{k,1} j x_{1,\Sigma}; \quad (81)$$

$$\dot{U}_{k,2} = 0 - \dot{I}_{k,2} j x_{2,\Sigma}; \quad (82)$$

$$\dot{U}_{k,0} = 0 - \dot{I}_{k,0} j x_{0,\Sigma}, \quad (83)$$

где $\dot{E}$ — результирующая или эквивалентная э. д. с. источников питания.

Поскольку для каждого генератора трехфазная симметричная система э. д. с. статора является системой

прямой последовательности, в схемах обратной и нулевой последовательности э. д. с. источников отсутствуют.

Создаваемые в схемах симметричных составляющих э. д. с. самоиндукции от прохождения токов прямой, обратной и нулевой последовательности учитываются в виде падений напряжения с обратным знаком в сопротивлениях $x_{1,\Sigma}$, $x_{2,\Sigma}$ и $x_{0,\Sigma}$ (рис. 34).

Чтобы определить результирующие сопротивления $x_{1,\Sigma}$, $x_{2,\Sigma}$ и $x_{0,\Sigma}$ для расчета несимметричного к. з., составляются схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательности.

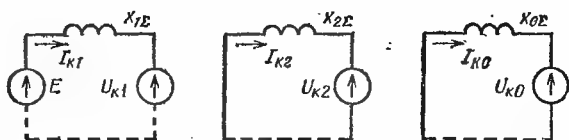


Рис. 34. Результирующие схемы замещения.

а — прямой последовательности; б — обратной; в — нулевой; E и $I_{\text{к}}$ — синусоидально изменяющиеся величины.

Схема замещения прямой последовательности составляется аналогично схеме замещения для расчета трехфазных к. з., так как токи трехфазного к. з. являются токами прямой последовательности: система токов трехфазного к. з. симметрична, уравновешена и имеет прямое чередование фаз.

Для всех элементов расчетной схемы $x_1 = x^{(3)}$, т. е. сопротивление прямой последовательности соответствует индуктивному сопротивлению при симметричном режиме установки и определяется по § 8.

Схема замещения обратной последовательности составляется из тех же элементов, что и схема прямой последовательности, так как пути прохождения тока для обеих последовательностей одинаковы; э. д. с. генераторов в схеме принимаются равными нулю.

Синхронные машины имеют разные сопротивления прямой и обратной последовательности. В расчетах можно принимать следующие значения: $x_2 = 1,22x''$ для машин с демпферными обмотками и $x_2 = 1,45x'$ для машин без демпферных обмоток. Для приближенных расчетов можно принимать $x_2 \approx x_1 \approx x''$.

Для асинхронных двигателей сопротивление обратной последовательности можно считать равным $x_2 = x''$.

Сопротивление обратной последовательности любой обобщенной нагрузки, отнесенное к ее полной мощности и к среднему номинальному напряжению ступени трансформации в месте ее присоединения, принимается равным $x_{2*} = 0,35$.

Для неподвижных элементов (трансформаторов, реакторов, линий) изменение порядка чередования фаз не оказывает влияния на взаимоиндукцию с соседними фазами и поэтому $x_2 = x_1$.

Схема замещения нулевой последовательности.

Слагающие нулевой последовательности в системах тока и напряжения возникают при несимметричных к.з. на землю (рис. 35). Токи нулевой последовательности, в сущности, представляют собой однофазный ток, разветвленный между тремя фазами.

Возвращение токов $3 I_0$ происходит через землю, а если линия защищена тросом, — по тросу и земле.

Для составления схемы замещения нулевой последовательности выявляются контуры, по которым могут проходить токи, имеющие одинаковое направление во всех фазах. В точке к. з., где фазы условно закорочены и приложено напряжение $U_{к,0}$, контуры объединяются, и поэтому составление схемы целесообразно начинать с этой точки. Чтобы получилась замкнутая цепь для прохождения токов нулевой последовательности, в схеме должна быть, по крайней мере, одна заземленная нейтраль. Если таких нейтралей несколько, то полученные цепи включаются параллельно.

В схему замещения элементы вводятся своими сопротивлениями нулевой последовательности.

Трансформаторы. Значение сопротивления нулевой последовательности x_0 зависит от конструкции и схемы соединения обмоток трансформатора.

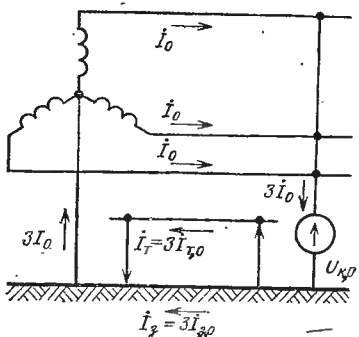


Рис. 35. Схема прохождения токов нулевой последовательности.

Эквивалентная электрическая схема замещения трансформатора, представленная на рис. 36, б, выполнена без учета активных сопротивлений и в предположении, что все параметры вторичной обмотки приведены к первичной. Ток намагничивания в схеме I_μ , называемый иначе током холостого хода I_0 , равен векторной разности токов $I_I - I_{II} = I_\mu$. Током I_μ создается основной, общий для обеих обмоток трансформатора поток Φ_μ или Φ_0 , который приводит к возникновению в обмотках I и II противо-э. д. с. $E_I = E_{II}$.

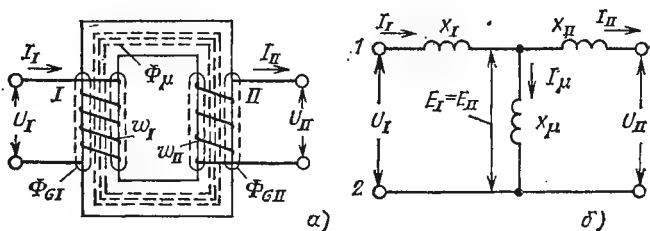


Рис. 36. Двухобмоточный трансформатор (а) и его полная схема замещения (б).

Значение тока I_μ характеризуется реактивностью намагничивания x_μ , включенной параллельно или шунтом к цепи вторичной обмотки трансформатора.

Токами I_I и I_{II} создаются потоки рассеяния первичной и вторичной обмоток $\Phi_{\sigma I}$ и $\Phi_{\sigma II}$, определяемые индуктивными сопротивлениями рассеяния $x_{\sigma I} = x_I$ и $x_{\sigma II} = x_{II}$.

Применительно к трехфазным трансформаторам назовем зажим 1 схемы замещения фазным, зажим 2 — нулевым или нейтральным.

При симметричном режиме, например при трехфазном к з., приложенное к зажимам 1 и 2 схемы напряжение прямой последовательности U_1 затрачивается на преодоление падения напряжения от тока той же последовательности I_1 в результирующем сопротивлении трансформатора x_1 :

$$x_1 = x_I + \frac{x_{II} x_{\mu 1}}{x_{II} + x_{\mu 1}},$$

где $x_{\mu 1}$ — сопротивление намагничивания для тока прямой последовательности.

Поскольку сопротивление $x_{\mu 1}$ во много раз больше сопротивления x_{II} , ответвлением тока в шунт намагничивания обычно пре-

небрегают и считают, что сопротивление прямой последовательности трансформатора, определяемое опытом к. з. (§ 8), равно:

$$x_1 \approx x_I + x_{II}.$$

Если при симметричном режиме ток проходит только в фазном проводе схемы рис. 36, б, то при однофазном к. з. цепь тока нулевой последовательности проходит от фазного зажима 1 к зажиму 2 или нейтрали и поэтому в ряде случаев сопротивление нулевой последовательности x_0 может отличаться от сопротивления x_I трансформатора.

Под действием напряжения U_0 , приложенного к трансформатору со стороны обмотки, соединенной в звезду без заземления нейтрали или в треугольник, токи I_0 по обмотке проходить не будут, так как при указанных схемах соединения обмоток исключается протекание токов I_0 . Следовательно, сопротивление нулевой последовательности трансформатора со стороны обмотки, соединенной в звезду без заземления нейтрали или в треугольник, равно бесконечности $x_0 = \infty$.

Конечное значение сопротивления x_0 может быть только со стороны обмотки, соединенной в звезду с заземленной нейтралью.

На рис. 37 приведены схемы замещения нулевой последовательности для некоторых исполнений трансформаторов.

• При соединении обмоток Y_0/Δ (рис. 37, а) цепь тока нулевой последовательности заканчивается обмоткой II, что отражено в схеме замещения подключением сопротивления x_{II} к нулевому выводу. Поскольку сопротивление $x_{\mu,0}$ значительно превосходит по значению x_{II} , действие шунта $x_{\mu,0}$ не учитывается. Таким образом, сопротивление x_0 для схемы соединения обмоток Y_0/Δ независимо от конструкции трансформатора равняется сопротивлению прямой последовательности x_I :

$$x_0 \approx x_I + x_{II} = x_I.$$

При соединении обмоток Y_0/Y (рис. 37, б) ток нулевой последовательности по обмотке II проходить не может, отсюда

$$x_0 = x_I + x_{\mu,0}.$$

Значение $x_{\mu,0}$ зависит от конструкции трансформатора. Для группы однофазных, трехфазных четырехстержневых и броневого трансформаторов $x_{\mu,0} = \infty$,

Для трехфазных трехстержневых трансформаторов $x_{\mu 0} = 0,3 \div 1$ (в относительных единицах).

При соединении обмоток $Y_0/Y/\Delta$ трехобмоточного трансформатора (рис. 37, в), учитывая, что ток нулевой последовательности по обмотке С не проходит, и пренебрегая, как и в первом случае (рис. 37, а), отсосом тока в шунт намагничивания, имеем $x_0 = x_B + x_H = x_{B-H}$

Воздушные линии электропередачи. Основываясь на том, что токи нулевой последовательности возвращаются

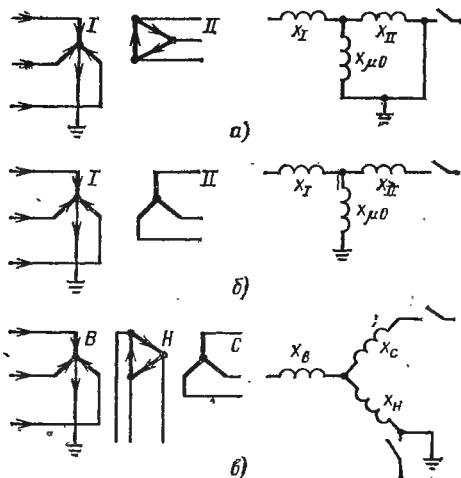


Рис. 37. Схемы замещения трансформаторов для токов нулевой последовательности.

через землю, воздушную ВЛ трехфазного тока можно заменить эквивалентной схемой из трех двухпроводных линий провод—земля. Отсюда сопротивление нулевой последовательности ВЛ определится как сумма сопротивлений самоиндукции x_L линии провод—земля и взаимоиנדукции ее x_M с соседними фазами; учитывая одинаковое направление токов I_0 по фазам ВЛ, имеем $x_0 = x_L + 2x_M$.

Индуктивные сопротивления x_L и x_M зависят от удельной проводимости земли и частоты тока; кроме того, x_L зависит от радиуса провода, а x_M — от расстояния между проводами ВЛ (см. [3]).

Для ВЛ без тросов или со стальными тросами $x_0 = 3,5$ $x_1 = 1,4$ Ом/км. Для ВЛ с тросами из хорошо проводящих металлов $x_0 = 2x_1 = 0,8$ Ом/км.

Если в симметричных системах прямой и обратной последовательностей взаимоиндукция фазы, принятой за основную, с соседними фазами уменьшает индуктивное сопротивление линии, так как токи в соседних фазах в сумме противоположны току данной фазы, то в системе нулевой последовательности взаимоиндукция приводит к возрастанию магнитного потока фазы, чем в основном и объясняется увеличение сопротивления x_0 по сравнению с x_1 и x_2 .

Наличие на линии хорошо проводящего заземленного троса, например медного, сталеалюминиевого, уменьшает сопротивление x_0 , так как токи в тросе направлены противоположно токам в линии (рис. 35). Стальной трос незначительно уменьшает x_0 , поэтому с его влиянием можно не считаться, и такие ВЛ допустимо рассматривать как линии без тросов.

Двухцепные ВЛ. При наличии двух параллельных цепей и к.з. за пределами линии или на концах цепей сопротивление нулевой последовательности каждой цепи увеличивается в результате взаимоиндукции с соседней цепью. Увеличение сопротивления происходит за счет совпадения по фазе токов нулевой последовательности во всех фазах двухцепной ВЛ.

В случае одинакового выполнения цепей схема замещения нулевой последовательности двухцепной ВЛ при к.з. одной из ее цепей изображается, как показано на рис. 38, б. В схеме принято, что относительное расстояние n изменяется от нуля до единицы при перемещении к.з. от шин B до шин A .

Значения сопротивлений x_1 , x_2 и x_3 находятся путем преобразования из треугольника в звезду и выражаются следующим образом:

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{1-n}{2} (x_0 - x_{M,0}), \\ x_2 &= \frac{n(1-n)}{2} (x_0 - x_{M,0}), \\ x_3 &= \frac{n}{2} (x_0 - x_{M,0}). \end{aligned} \quad (84)$$

На рис. 38, в и г даны схемы замещения нулевой последовательности при к.з. на линии у шин B и A . Эти схемы являются частными случаями схемы рис. 38, б и получаются при подстановке вместо n его значений $n=0$ и $n=1$ соответственно для шин B и A .

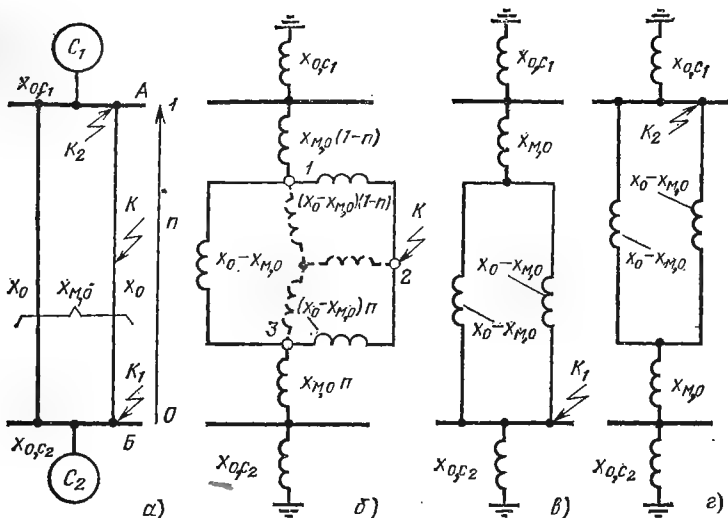


Рис. 38. Схемы замещения нулевой последовательности двухцепной ВЛ.

а — исходная схема; *б* — схема замещения при к. з. в любой точке ВЛ; *в*, *г* — то же при к. з. в конце и начале ВЛ.

Исходя из схемы замещения рис. 38, *в* (*г*), сопротивление нулевой последовательности двухцепной ВЛ равно:

$$x_0'' = x_{M,0} + \frac{x_0 - x_{M,0}}{2} = \frac{x_0 + x_{M,0}}{2};$$

одной цепи двухцепной ВЛ с учетом взаимоиנדукции другой цепи: $x_0' = x_0 + x_{M,0}$;

одной цепи двухцепной ВЛ при отключении другой цепи: $x_0' = x_0$, где x_0 — индуктивное сопротивление одноцепной ВЛ.

Индуктивные сопротивления ВЛ x_0 и взаимоиנדукции $x_{M,0}$ ориентировочно можно принимать следующие: для ВЛ без тросов или со стальными тросами:

$$x_0 \approx 3,5x_1 \text{ (для одноцепных ВЛ),}$$

$$x_{M,0} \approx 2x_1;$$

для ВЛ с тросами из хорошо проводящих металлов:

$$x_0 \approx 2x_1 \text{ (для одноцепных ВЛ), } x_{M,0} \approx x_1,$$

считая x_1 равным в среднем 0,4 Ом/км.

Схемы замещения нулевой последовательности при к. з. на линии вблизи шин и каскадном отключении линий легко получаются из схем 38, *в* и *г* отсоединением сопротивления линии с к. з. от шин *А* или *Б* в зависимости от места повреждения.

В схеме блоков линия — трансформатор рис. 39, *а* трансформатор по сопротивлению нулевой последовательности рассматривается как продолжение линии или элемент линии, и поэтому схема замещения блоков рис. 39, *б* строится по аналогии со схемой параллельных линий рис. 38, *б*.

Отсюда сопротивления эквивалентной звезды x_1 , x_2 , x_3 для схемы блоков равны:

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{(1-n)(x_0 - x_{M,0})}{2}; \\ x_2 &= \frac{(1-n)(x_0 - x_{M,0})[n(x_0 - x_{M,0}) + x_{0,T}]}{2(x_0 - x_{M,0} + x_{0,T})}; \\ x_3 &= \frac{n(x_0 - x_{M,0}) + x_{0,T}}{2}. \end{aligned} \quad (85)$$

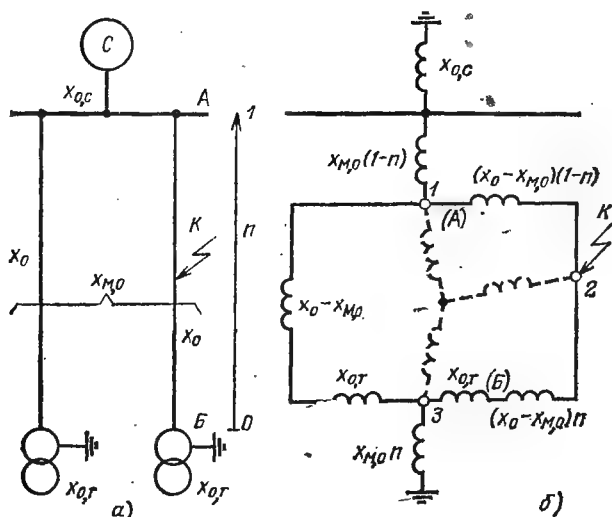


Рис. 39. Схема замещения нулевой последовательности двух блоков ВЛ — трансформатор.

а — исходная схема; *б* — схема замещения в любой точке ВЛ.

Кабели. Сопротивление нулевой последовательности кабелей принимают в пределах $x_0 = (3,5 \div 4,6) x_1$ в зависимости от возвращения токов нулевой последовательности только по оболочке кабеля или по оболочке и земле.

Реакторы. В реакторах взаимоиנדукция между фазами сказывается незначительно, из-за чего в расчетах обычно принимают $x_0 \approx x_1$.

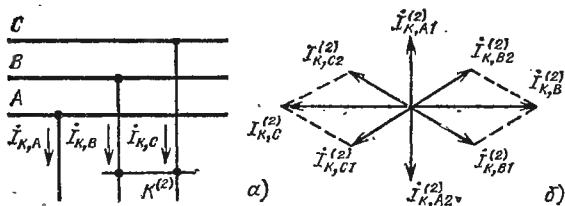


Рис. 40. Двухфазное к. з. (а) и векторная диаграмма токов в месте повреждения (б).

Токи и напряжения в месте несимметричного к. з. Для расчетов указанных величин предварительно должны быть составлены схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательности и определены результирующие сопротивления $x_{1,\Sigma}$, $x_{2,\Sigma}$, $x_{0,\Sigma}$ и результирующая э. д. с. E .

В качестве положительного принимаем направление токов к месту короткого замыкания.

Двухфазное к. з. Двухфазное к. з. между фазами В и С (рис. 40) характеризуется следующими условиями:

$$\dot{I}_{KA}^{(2)} = 0; \dot{I}_{K,B}^{(2)} = -\dot{I}_{K,C}^{(2)}; \dot{U}_{K,B}^{(2)} - \dot{U}_{K,C}^{(2)} = 0.$$

Так как сумма фазных токов равна нулю, то система является уравновешенной и, следовательно, $\dot{I}_{K,0}^{(2)} = 0$.

По (71) произведем разложение тока фазы А на симметричные составляющие:

$$\dot{I}_{K,A}^{(2)} = \dot{I}_{K,A1}^{(2)} + \dot{I}_{K,A2}^{(2)} = 0,$$

откуда

$$\dot{I}_{K,A1}^{(2)} = -\dot{I}_{K,A2}^{(2)}. \quad (86)$$

Исходя из условия $\dot{U}_{к,В}^{(2)} = \dot{U}_{к,С}^{(2)}$, и рассматривая его совместно с (76) и (77), можно убедиться в том, что

$$\dot{U}_{к,А1}^{(2)} = \dot{U}_{к,А2}^{(2)}. \quad (87)$$

Из (87), (81) и (82) вытекает равенство

$$\dot{E}_A - \dot{I}_{к,А1}^{(2)} jx_{1,\Sigma} = -\dot{I}_{к,А2}^{(2)} jx_{2\Sigma},$$

заменив в котором $-\dot{I}_{к,А2}^{(2)}$ на $\dot{I}_{к,А1}^{(2)}$, согласно (86) получим расчетное выражение для определения тока при двухфазном к. з.:

$$\dot{I}_{к,А1}^{(2)} = \frac{\dot{E}_A}{j(x_{1,\Sigma} + x_{2,\Sigma})}. \quad (88)$$

Комплексная форма выражения (88) означает, что ток отстает от фазной э. д. с. на угол 90° (деление на j), и по абсолютному значению равен:

$$I_{к,А1}^{(2)} = \frac{E_A}{x_{1,\Sigma} + x_{2,\Sigma}}. \quad (89)$$

Токи в поврежденных фазах B и C находим по (76), (77) и (86):

$$\dot{I}_{к,В}^{(2)} = a^2 \dot{I}_{к,А1}^{(2)} + a \dot{I}_{к,А2}^{(2)} = (a^2 - a) \dot{I}_{к,А1}^{(2)} = -j\sqrt{3} \dot{I}_{к,А1}^{(2)}; \quad (90)$$

$$\dot{I}_{к,С}^{(2)} = (a - a^2) \dot{I}_{к,А1}^{(2)} = j\sqrt{3} \dot{I}_{к,А1}^{(2)}. \quad (91)$$

Абсолютное значение полного тока при двухфазном к. з. определится из (89) — (91):

$$I_{к}^{(2)} = \frac{\sqrt{3} E}{x_{1,\Sigma} + x_{2,\Sigma}}. \quad (92)$$

На основании (92) для момента возникновения к. з.

$$I^{(2)''} = \frac{\sqrt{3} E''}{\sqrt{3} (x_{1,\Sigma} + x_{2,\Sigma})} = \frac{E''}{x_{1,\Sigma} + x_{2,\Sigma}}, \quad (93)$$

где E'' — сверхпереходная междуфазная э. д. с.

В случае питания к. з. от энергосистемы

$$I^{(2)} = \frac{\sqrt{3} U_{\text{ср}}}{\sqrt{3} (x_{1,\Sigma} + x_{2,\Sigma})} = \frac{U_{\text{ср}}}{x_{1,\Sigma} + x_{2,\Sigma}}. \quad (94)$$

На рис. 40, б произведено построение симметричных составляющих и полных токов для двухфазного к. з. В-С.

При определении напряжений в месте к. з. следует учесть следующее: для систем с заземленной нейтралью,

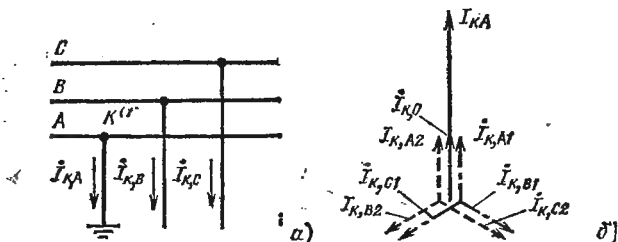


Рис. 41. Однофазное к. з. (а) и векторная диаграмма токов в месте повреждения (б).

когда сопротивление $x_{0,\Sigma}$ имеет конечное значение, напряжение $\dot{U}_{\text{к,опри}}^{(2)}$ при $I_{\text{к,о}}^{(2)} = 0$ на основании (83) также равно нулю; для систем с изолированной нейтралью, когда $x_{0,\Sigma} = \infty$ и $\dot{U}_{\text{к,о}}^{(2)} = -\infty \cdot 0$ — неопределенность, короткие замыкания не влияют на смещение нейтрали системы относительно земли и $\dot{U}_{\text{к,о}}^{(2)}$ в уравнениях напряжений не рассматривается.

Симметричные составляющие напряжений $\dot{U}_{\text{к,А1}}^{(2)}$ и $\dot{U}_{\text{к,А2}}^{(2)}$ можно определить по (81) и (82), после чего, пользуясь (71), (76) и (77) для вычисления полных значений, найти напряжения в месте к. з.

Однофазное к. з. на землю одной из фаз, например фазы А (рис. 41), определяется следующими условиями:

$$\dot{I}_{\text{к,В}}^{(1)} = 0; \quad \dot{I}_{\text{к,С}}^{(1)} = 0; \quad \dot{U}_{\text{к,А}}^{(1)} = 0.$$

Так как токи в двух фазах отсутствуют, то очевидно, что симметричные составляющие поврежденной фазы А в соответствии с (78) — (80) равны:

$$\dot{I}_{\text{к,А1}}^{(1)} = \dot{I}_{\text{к,А2}}^{(1)} = \dot{I}_{\text{к,А0}}^{(1)} = \frac{1}{3} \dot{I}_{\text{к,А}}^{(1)}.$$

Выражая напряжение $\dot{U}_{\kappa, A}^{(1)}$ через симметричные составляющие и их значения в (81) — (83), получим:

$$\dot{U}_{\kappa, A}^{(1)} = \dot{U}_{\kappa, A1}^{(1)} + \dot{U}_{\kappa, A2}^{(1)} + \dot{U}_{\kappa, A0}^{(1)} = 0$$

и далее:

$$\dot{E}_A - j_{\kappa, A1}^{(1)} j(x_{1, \Sigma} + x_{2, \Sigma} + x_{0, \Sigma}) = 0,$$

откуда

$$j_{\kappa, A1}^{(1)} = \frac{\dot{E}_A}{j(x_{1, \Sigma} + x_{2, \Sigma} + x_{0, \Sigma})} \quad (95)$$

Абсолютное значение полного тока к.з. равно:

$$I_{\kappa}^{(1)} = 3I_{\kappa, 1}^{(1)} = \frac{3E}{x_{1, \Sigma} + x_{2, \Sigma} + x_{0, \Sigma}}. \quad (96)$$

Для начального момента времени

$$I^{(1)''} = \frac{3E''}{\sqrt{3}(x_{1, \Sigma} + x_{2, \Sigma} + x_{0, \Sigma})} = \frac{\sqrt{3}E''}{x_{1, \Sigma} + x_{2, \Sigma} + x_{0, \Sigma}}, \quad (97)$$

где E'' — сверхпереходная междуфазная э. д. с.

При питании от энергосистемы

$$I^{(1)} = \frac{3U_{\text{ср}}}{\sqrt{3}(x_{1, \Sigma} + x_{2, \Sigma} + x_{0, \Sigma})} = \frac{\sqrt{3}U_{\text{ср}}}{x_{1, \Sigma} + x_{2, \Sigma} + x_{0, \Sigma}}. \quad (98)$$

При необходимости по (81) — (83) можно определить симметричные составляющие напряжений, а затем по (71), (76) и (77) — полные напряжения фаз.

Несимметричные к.з. за трансформаторами. При переходе через трехфазный трансформатор (или трехфазную группу однофазных трансформаторов) в нормальном режиме токи и напряжения в общем случае изменяются по значению и фазе, зависящей от группы соединения обмоток трансформатора. В частных случаях возможна трансформация только по значению или по фазе, например для трансформаторов с соединением обмоток $Y/Y-12$ и для трансформаторов с соединением обмоток Y/Δ и коэффициентом трансформации $n=1$ соответственно.

Коэффициентом трансформации n называется отношение междуфазных напряжений холостого хода первичной и вторичной обмоток трансформатора:

$$n = \frac{U_{1x}}{U_{2x}}.$$

Соотношение первичных и вторичных величин в трехфазном трансформаторе при $n > 1$, исходя из равенства мощностей в обмотках и в пренебрежении потерями на намагничивание, определяется следующими формулами: для понижающего трансформатора

$$U_I = nU_{II} \text{ и } I_I = \frac{1}{n} I_{II}; \quad (99)$$

для повышающего трансформатора

$$U_I = \frac{1}{n} U_{II} \text{ и } I_I = n I_{II},$$

где U_I , U_{II} и I_I , I_{II} — соответственно линейные напряжения и токи.

В связи с тем, что симметричные системы более просты, для аналитических вычислений или построения векторных диаграмм токов и напряжений, получающихся в результате трансформации в несимметричных режимах, целесообразно использование метода симметричных составляющих. Поскольку при этом методе результирующие величины получаются путём сложения симметричных составляющих, достаточно задать коэффициенты трансформации по (99) и углы поворота этих систем, приведенные ниже, чтобы получить действительные значения и угловые смещения токов и напряжений при переходе через трансформатор.*

Смещение систем прямой и обратной последовательности по углу при трансформации со стороны звезды на сторону треугольника производится поворотом векторов прямой последовательности на угол $360^\circ - 30^\circ \cdot N$, векторов обратной последовательности на угол $-(360^\circ - 30^\circ \cdot N)$. При трансформации от треугольника к звезде знаки углов поворота меняются на обратные, соответственно: $-(360^\circ - 30^\circ \cdot N)$ и $360^\circ - 30^\circ \cdot N$, где N — номер группы соединения обмоток трансформатора.

Токи нулевой последовательности вследствие совпадения по модулю и фазе не выходят за пределы обмотки, соединенной треугольником, и в линейных проводах треугольника отсутствуют.

Однако на практике редко прибегают к аналитическому или векторному решению задач по трансформации симметричных составляющих, учитывая одновременно

* Имеется в виду применение для симметричных составляющих комплексных коэффициентов трансформации (см. [2]).

коэффициент трансформации и угловые смещения систем. Чаще решение производится в два приема*:

для заданной группы соединений трансформатора и $n=1$ выясняются соотношения токов (напряжений) со стороны питания по отношению к токам (напряжениям) в месте к. з.;

затем для конкретных условий вычисляется ток в месте к. з., и по формулам приведения § 6 и соотношениям, полученным выше, определяются действительные токи (напряжения) на обеих сторонах трансформатора.

Зная из предыдущего текста, как оперировать симметричными составляющими, при прохождении через трансформатор, рассмотрим случаи несимметричных к. з. за трансформаторами.

На рис. 42—44 приведены векторные диаграммы токов к. з. для трансформаторов с наиболее распространенными группами соединения обмоток $Y/\Delta -11$ и $Y_0/\Delta -11$ и коэффициентом трансформации $n=1$. Для такого рода трансформаторов число витков в обмотках, соединенных в треугольник, в $\sqrt{3}$ раз превышает число витков обмоток, соединенных в звезду: $n = w_Y \sqrt{3} / w_\Delta = 1$.

Полные токи в обмотках трансформаторов и на их выводах получены при помощи сложения симметричных составляющих токов к. з.

Двухфазное к. з. на стороне треугольника (рис. 42). Рассмотрение начнем с места к. з.

В связи с тем, что токи к. з. в фазах B' и C' равны по значению и противоположны по направлению (рис. 42, г), составляющие нулевой последовательности при данном виде к. з. отсутствуют.

При переходе с линейных выводов в фазы треугольника a, b, c , что в данном случае соответствует фазам звезды, система токов прямой последовательности (рис. 42, б) поворачивается на угол -30° , токов обратной последовательности (рис. 42, в) — на угол $+30^\circ$.

Токи к. з. протекают по всем трем фазам треугольника, поскольку $I_K^{(2)}$ распределяется между одной фазой и двумя обратно пропорционально их сопротивлениям — как $\frac{2}{3} I_K^{(2)}$ и $\frac{1}{3} I_K^{(2)}$.

* Такой подход означает разделение комплексного коэффициента трансформации на два множителя и поочередные действия с ними.

На стороне звезды изменения систем токов по фазе не происходит, но по значению токи возрастают в $\sqrt{3}$ раз за счет соотношения витков $\omega_Y/\omega_\Delta = 1/\sqrt{3}$.

В результате трансформации в фазах звезды будут протекать токи (рис. 42, з): в фазе С $2I_K^{(2)}/\sqrt{3}$ и в фазах А и В $I_K^{(2)}/\sqrt{3}$.

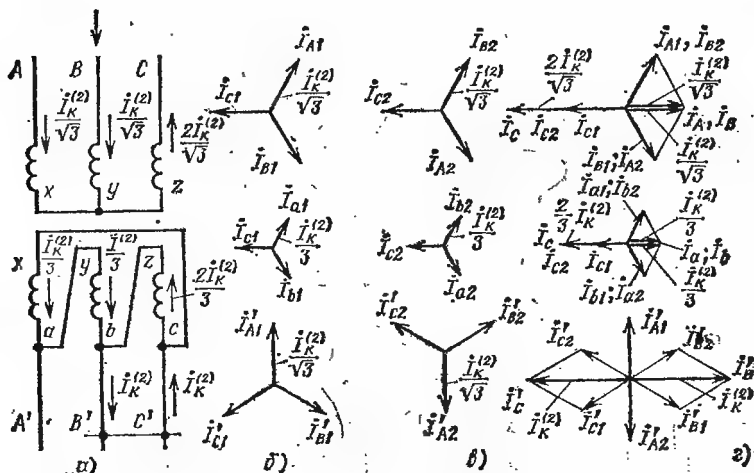


Рис. 42. Двухфазное к. з. на стороне треугольника за трансформатором с группой соединения обмоток $Y/\Delta-11$.

а — исходная схема; векторные диаграммы: токов прямой последовательности (б); обратной последовательности (в); полных токов к. з. (г).

При к. з. между фазами СА и АВ максимальное значение тока к. з. со стороны звезды будет циклически перемещаться в фазы А и В. Токи к. з. со стороны звезды при равных сопротивлениях в схемах прямой и обратной последовательности соответствуют току трехфазного к. з.

в одной фазе [см. (104)] $I_{K, \max}^{(2)} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\sqrt{3}}{2} I_K^{(3)}$ и половине этого тока в двух других фазах.

Двухфазное к. з. на стороне звезды. Системы токов прямой и обратной последовательности (рис. 43, б и в) при трансформации со стороны звезды в фазы треугольника уменьшаются в $\sqrt{3}$ раз за счет

большого в $\sqrt{3}$ раз числа витков в обмотках, соединенных в треугольник.

Ток к.з. протекает только по двум фазам треугольника, соответствующим поврежденным фазам на стороне звезды.

При переходе в линейные провода треугольника система токов прямой последовательности (рис. 43, б) поворачивается на угол $+30^\circ$, токов обратной последовательности (рис. 43, в) на угол -30° .

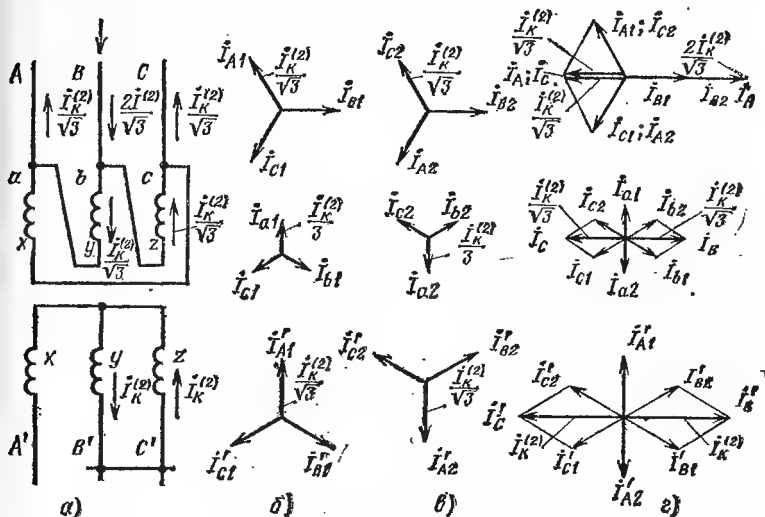


Рис. 43. Двухфазное к. з. на стороне звезды за трансформатором с группой соединения обмоток $\Delta/11$.

а — исходная схема; векторные диаграммы: токов прямой последовательности (б); обратной последовательности (в); полных токов к. з. (г).

Аналогично предыдущему случаю к.з. токи в линейных проводах треугольника (рис. 43, г) составляют: в фазе В $2I_K^{(2)}/\sqrt{3}$, в фазах А и С $I_K^{(2)}/\sqrt{3}$, и при циклическом изменении фаз к.з. максимальное значение тока также перемещается. Если сопротивления схем прямой и обратной последовательности равны, то ток в одной из фаз со стороны треугольника составит $I_K^{(3)}$ в двух других $I_K^{(3)}/2$.

Однофазное к.з. на стороне звезды (рис. 44). Системы токов прямой, обратной и нулевой после-

довательности (рис. 44, б, в, г) трансформируются в фазы треугольника без изменения направления, уменьшаясь в $\sqrt{3}$ раз (см. предыдущий случай к. з.).

Ток к. з. протекает только в одной фазе треугольника, соответствующей фазе к. з.

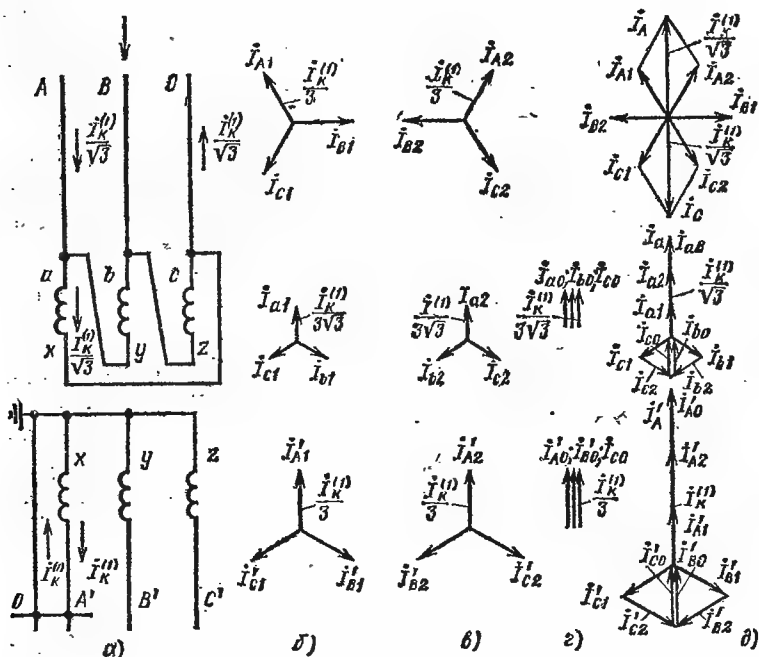


Рис. 44. Однофазное к. з. на стороне звезды за трансформатором с группой соединения обмоток $Y_0/\Delta-11$.

а.—исходная схема; векторные диаграммы: токов прямой последовательности (б); обратной последовательности (в); нулевой последовательности (г); полных токов к. з. (д).

Углы поворота систем токов прямой и обратной последовательности при выходе из фаз треугольника такие же, как при двухфазном к. з. на стороне звезды.

Результирующие токи в линейных проводах треугольника (рис. 44, д) протекают по двум фазам, А и С, и равны $I_K^{(1)}/\sqrt{3}$. При циклическом изменении фазы к. з. протекание токов в линейных выводах треугольника изменяется аналогично.

Обобщение формул для определения токов несимметричных к.з. Из (92) и (96) для полных токов в месте к.з. следует, что по абсолютному значению ток несимметричного к.з. пропорционален току прямой последовательности при данном виде к.з.:

$$I_k^{(n)} = m^{(n)} I_{k,1}^{(n)}, \quad (100)$$

где $m^{(n)}$ — коэффициент пропорциональности, значение которого зависит от вида к.з. (для трехфазного к.з. $m^{(3)}=1$, для двухфазного к.з. $m^{(2)}=\sqrt{3}$, для однофазного к.з. $m^{(1)}=3$); $I_{k,1}^{(n)}$ — ток прямой последовательности для данного вида к.з.

В общем виде выражение для определения тока $I_{k1}^{(n)}$ можно записать как

$$I_{k,1}^{(n)} = \frac{E}{x_{1,\Sigma} + x_{\text{доп}}^{(n)}}, \quad (101)$$

где $x_{1,\Sigma}$ — сопротивление прямой последовательности для данного вида к.з., характеризующее удаленность точки короткого замыкания; $x_{\text{доп}}^{(n)}$ — дополнительное индуктивное сопротивление, зависящее от вида к.з. (для трехфазного к.з. $x_{\text{доп}}^{(3)}=0$, для двухфазного к.з. $x_{\text{доп}}^{(2)}=x_{2,\Sigma}$, для однофазного к.з. $x_{\text{доп}}^{(1)}=x_{2,\Sigma} + x_{0,\Sigma}$).

На основании (101) ток прямой последовательности определяется как ток трехфазного к.з. в точке, удаленной от действительной точки к.з. на дополнительное сопротивление $x_{\text{доп}}^{(n)}$.

Соотношение токов двухфазного и трехфазного к.з. для начального момента времени и ударный ток двухфазного к.з. На практике, как правило, принимают $x_{1,\Sigma} = x_{2,\Sigma}^*$. После замены $x_{2,\Sigma}$ на $x_{1,\Sigma}$ выражения (93) и (94) для определения тока двухфазного к.з. в начальный момент времени приобретут следующий вид:

$$I^{(2)''} = \frac{E''}{2x_{1,\Sigma}} \quad (102)$$

* Имеется в виду использование для приближенных расчетов в качестве сопротивления обратной последовательности сопротивление генераторов $x_2 \approx x_d$.

$$I^{(2)} = \frac{U_{\text{ср}}}{2x_{1,\Sigma}} \quad (103)$$

Обозначив начальное значение тока через $I_{\text{п},0}$ и поделив (102) на (50), а также (103) на (52), получим искомое соотношение токов для двухфазного и трехфазного к. з.

$$\frac{I_{\text{п},0}^{(2)}}{I_{\text{п},0}^{(3)}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (104)$$

где $I_{\text{п},0}^{(2)}$ и $I_{\text{п},0}^{(3)}$ — соответственно действующие значения периодической слагающей тока двухфазного и трехфазного к. з. для $t=0$.

Поскольку при определении тока прямой последовательности двухфазное к. з. можно условно представить как некоторое трехфазное за сопротивлением $x_{1,\Sigma} + x_{2,\Sigma}$, ударный ток двухфазного к. з. можно выразить по аналогии с (64) как

$$i_{\text{уд}}^{(2)} = \sqrt{2} k_{\text{уд}}^{(2)} I_{\text{п},0}^{(2)} \quad (105)$$

Ударный коэффициент определяют в зависимости от вида расчетной схемы на основании выражения (64) или (66), применяя для расчета $T_a^{(2)}$ увеличенные по сравнению с трехфазным к. з. значения x_{Σ} и r_{Σ} соответственно на $\Delta x = x_{2,\Sigma}$ и $\Delta r = r_{2,\Sigma}$.

Исходя из условия $x_{1,\Sigma} = x_{2,\Sigma}$ и заменяя в (105) $I_{\text{п},0}^{(2)}$ в соответствии со (104), получим:

$$i_{\text{уд}}^{(2)} = \sqrt{2} k_{\text{уд}}^{(2)} \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\text{п},0}^{(3)}$$

При равенстве ударных коэффициентов ударный ток трехфазного к. з. [см. (64), (66)] превосходит по значению ток двухфазного к. з., причем соотношение токов составляет:

$$\frac{i_{\text{уд}}^{(3)}}{i_{\text{уд}}^{(2)}} = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1,15.$$

Определение токов несимметричных к. з. для различных моментов времени. Для вычисления тока прямой последовательности несим-

метричного к. з. пользуются расчетными кривыми (§ 11) на основании положения, что ток прямой последовательности соответствует току некоторого трехфазного к. з. за индуктивным сопротивлением $x_{1,\Sigma} + x_{\text{доп}}^{(n)} = x_{\Sigma}^{(n)}$.

Аналогично изложенному в § 11, по току прямой последовательности для генерирующих ветвей вычисляют отношения $I_{1п,0,r}/I_{\text{ном},r}$, а при необходимости также $I_{1п,0,r}/I_{1п,0,\Sigma}$ и затем, пользуясь кривыми рис. 24, а или б находят $I_{1п,t,r}/I_{1п,0,r}$ или $I_{1п,t,\Sigma}/I_{1п,0,\Sigma}$.

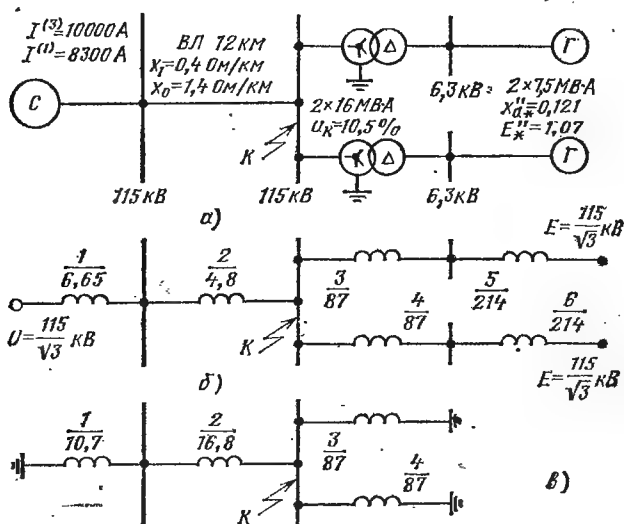


Рис. 45. Схемы к примеру 22.

а — расчетная схема сети; б, в — схемы замещения.

По найденным относительным токам прямой последовательности, пользуясь коэффициентами пропорциональности в (100) и зная токи прямой последовательности для $t=0$, определяют полные токи несимметричного к. з. для заданных моментов времени.

Пример 22. Определить ток к. з. в начальный момент времени для трехфазного, двухфазного и однофазного к. з. в точке K (рис. 45, а).

На шинах 115 кВ связи с энергосистемой заданы токи трехфазного к. з. $I^{(3)} = 10000 \text{ A}$ и однофазного к. з. $I^{(1)} = 3I_0 = 8300 \text{ A}$.

Решение начинаем с составления схем замещения.

Схема замещения прямой последовательности составляется аналогично схемам замещения для расчета токов трехфазного к. з. и дополнительных пояснений не требует. Так как в данном случае для всех элементов принято, что $x_1 = x_2$, схема замещения обратной последовательности по сопротивлениям получается такой же, как и схема прямой последовательности, но только не содержит э. д. с. Обе схемы на рис. 45, б. условно совмещены.

В каждом трансформаторе 16 МВ·А токи нулевой последовательности замыкаются в обмотке, соединенной в треугольник, так что в цепи генераторов токи нулевой последовательности не проходят, и сопротивления генераторов в схему нулевой последовательности не вводятся.

Заданный ток $I^{(1)} = 3I_0$ со стороны энергосистемы свидетельствует о том, что в системе также имеются трансформаторы с заземленными нейтральными, которые (т. е. нейтрали) удалены от точки к. з. на суммарное сопротивление системы $x_{0,1}^*$ и ВЛ $x_{0,2}$.

Таким образом, по числу заземленных нейтралей — трансформаторов 16 МВ·А и энергосистемы — в схеме нулевой последовательности получим три ветви, объединенные в точке к. з. (рис. 45, в).

За расчетную ступень напряжения принимаем $U_0 = 115$ кВ.

Для упрощения из-за малой мощности генераторов ($E_{\text{вк}} = 1,005U$) принимаем их приведенные э. д. с. равными напряжению энергосистемы.

На схемах замещения проставляем значения сопротивлений в соответствии со следующими подсчетами.

Схема замещения прямой (обратной) последовательности:

$$x_{1,1} = \frac{115\,000}{\sqrt{3 \cdot 10\,000}} = 6,65 \text{ Ом};$$

$$x_{1,2} = 0,4 \cdot 12 = 4,8 \text{ Ом};$$

$$x_{1,3} = x_{1,4} = 0,105 \frac{115^2}{16} = 87 \text{ Ом};$$

$$x_{1,5} = x_{1,6} = 0,121 \frac{115^2}{7,5} = 214 \text{ Ом}.$$

Схема замещения нулевой последовательности. Поясним, как определяется сопротивление нулевой последовательности системы:

* Первая цифра индекса означает последовательность, вторая — порядковый номер элемента.

Если согласно (98)

$$\frac{I^{(1)}}{3} = \frac{\frac{U_{\text{ср}}}{\sqrt{3}}}{2x_{1;1} + x_{0;1}},$$

$$\text{то } x_{0;1} = \frac{\sqrt{3} U_{\text{ср}}}{I^{(1)}} - 2x_{1;1} = \frac{\sqrt{3} \cdot 115 \cdot 10^3}{8300} - 2 \cdot 6,65 = 10,7 \text{ Ом};$$

$$x_{0;2} = 1,4 \cdot 12 = 16,8 \text{ Ом};$$

$$x_{0;3} = x_{0;4} = 87 \text{ Ом}.$$

— Трехфазное к. з. Сопротивление цепи энергосистемы до точки к. з.

$$x_{1;1} + x_{1;2} = 6,65 + 4,8 = 11,45 \text{ Ом}.$$

Сопротивление цепи генераторов до точки к. з.

$$\frac{x_{1;3} + x_{1;5}}{2} = \frac{87 + 214}{2} = 150,5 \text{ Ом}.$$

Результирующее сопротивление схемы

$$x_{1,\Sigma} = 11,45 // 150,5 = 10,64 \text{ Ом}.$$

Ток трехфазного к. з. в точке К составит:

$$I^{(3)} = \frac{115000}{\sqrt{3} \cdot 10,64} = 6240 \text{ А}.$$

Двухфазное к. з. На основании (104) ток двухфазного к. з. в точке К

$$I^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 6240 = 5400 \text{ А}.$$

Однофазное к. з. Результирующее сопротивление схемы нулевой последовательности

$$x_{0,\Sigma} = (10,7 + 16,8) // \frac{87}{2} = 16,85 \text{ Ом}.$$

Расчетное сопротивление для определения тока I_0

$$x_{\Sigma}^{(1)} = 2x_{1,\Sigma} + x_{0,\Sigma} = 10,64 \cdot 2 + 16,85 = 38,13 \text{ Ом}.$$

Ток однофазного к. з. в точке К согласно (98) составит:

$$I^{(1)} = 3I_0 = \frac{115 \cdot 3 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 38,13} = 5220 \text{ А}.$$

Пример 23. На втулках 115 кВ трансформатора отпаечной подстанции в точке К (рис. 46, а) произошло однофазное к. з. Требуется определить ток к. з. для начального момента времени.

Сопротивления схем замещения (рис. 46, б, в) таковы: прямой (обратной) последовательности:

$$x_{1,1} = \frac{115\,000}{\sqrt{3 \cdot 8900}} = 7,45 \text{ Ом};$$

$$x_{1,2} = 0,4 \cdot 48 = 19,2 \text{ Ом};$$

$$x'_{1,3} = x''_{1,3} = 9,6 \text{ Ом};$$

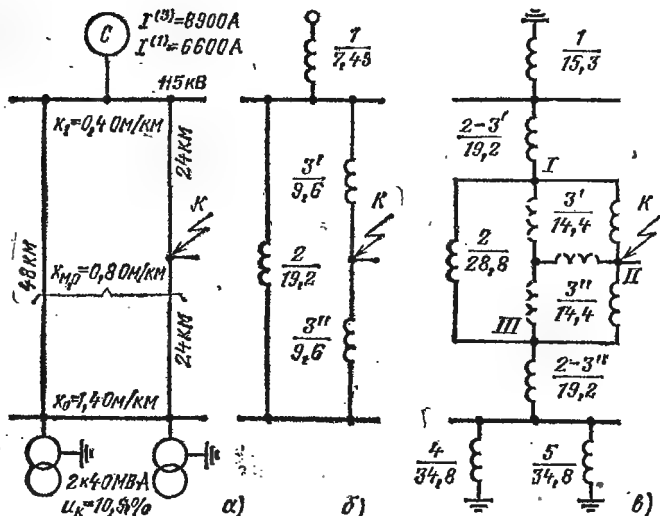


Рис. 46. Схемы к примеру 23.

а — расчетная схема сети; б, в — схемы замещения: прямой (обратной) и нулевой последовательностей. Штрихами помечены доли сопротивлений поврежденной ВЛ и взаимной индукции между ВЛ.

нулевой последовательности (рис. 38):

$$x_{0,1} = \frac{115 \sqrt{3} \cdot 10^3}{6600} - 2 \cdot 7,45 = 15,3 \text{ Ом};$$

$$x_{0,2} = (1,4 - 0,8) \cdot 48 = 28,8 \text{ Ом};$$

$$x'_{0,3} = x''_{0,3} = 14,4 \text{ Ом};$$

$$x''_{0,2-3} = x'_{0,2-3} = 0,8 \cdot 48 \cdot 0,5 = 19,2 \text{ Ом};$$

$$x_{0,4} = x_{0,5} = 0,105 \frac{115^2}{40} = 34,8 \text{ Ом.}$$

В соответствии с (84):

$$x_{0,1} = 0,25 \cdot 28,8 = 7,2 \text{ Ом;}$$

$$x_{0,II} = 0,25 \cdot 0,5 \cdot 28,8 = 3,6 \text{ Ом;}$$

$$x_{0,III} = 0,25 \cdot 28,8 = 7,2 \text{ Ом.}$$

Результирующее сопротивление схемы прямой (обратной) последовательности

$$x_{1,\Sigma} = 7,45 + (19,2 + 9,6) // 9,6 = 14,65 \text{ Ом.}$$

Результирующее сопротивление схемы нулевой последовательности

$$x_{0,\Sigma} = (15,3 + 19,2 + 7,2) // (17,4 + 19,2 + 7,2) + 3,6 \approx 25 \text{ Ом.}$$

Расчетное сопротивление для определения тока I_0

$$x_{\Sigma}^{(1)} = 2 \cdot 14,65 + 25 = 54,3 \text{ Ом.}$$

Ток в месте повреждения

$$I^{(1)} = 3I_0 = 3 \cdot \frac{115 \cdot 10^3}{\sqrt{3 \cdot 54,3}} = 3670 \text{ А.}$$

Пример 24. Вычислить ток к. з. в точках К-1 и К-2 схемы рис. 47, а для трехфазного и однофазного к. з. в момент времени $t=0$. Данные по сопротивлениям схем замещения (рис. 47, б, в, г) получены следующие.

Сопротивления схем замещения прямой (обратной) последовательности:

$$x_{1,1} = \frac{115000}{\sqrt{3 \cdot 12000}} = 5,54 \text{ Ом;}$$

$$x_{1,2} = 0,4 \cdot 30 = 12 \text{ Ом.}$$

Сопротивления схем замещения нулевой последовательности (см. рис. 39):

$$x_{0,1} = \frac{115 \sqrt{3 \cdot 10^3}}{10000} - 2 \cdot 5,54 = 8,82 \text{ Ом;}$$

$$x_{0,2} = x_{0,3} = (1,4 - 0,8) \cdot 30 = 18 \text{ Ом;}$$

$$x_{0,2-3} = 0,8 \cdot 30 = 24 \text{ Ом;}$$

$$x_{0,4} = x_{0,5} = 0,105 \frac{115^2}{63} = 22 \text{ Ом.}$$

На основании (85):

$$x_{0,I} = \frac{18}{2} = 9 \text{ Ом}; \quad x_{0,II} = \frac{18 \cdot 22}{2(18 + 22)} = 4,95 \text{ Ом};$$

$$x_{0,III} = \frac{22}{2} = 11 \text{ Ом}.$$

Короткое замыкание в точке K-1

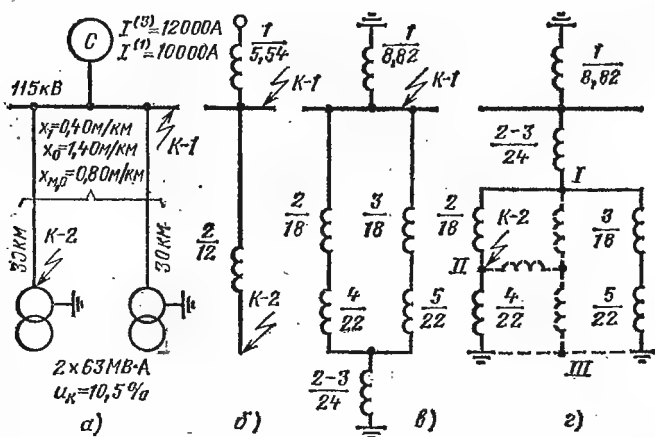


Рис. 47. Схемы к примеру 24.

а — расчетная схема сети; б — схема замещения прямой (обратной) последовательности; в, г — то же — нулевой последовательности.

Трехфазное:

$$I^{(3)} = 12000 \text{ А.}$$

Однофазное:

$$x_{0,\Sigma} = 8,82 // 44 = 7,35 \text{ Ом};$$

$$x_{\Sigma}^{(1)} = 2 \cdot 5,54 + 7,35 = 18,43 \text{ Ом};$$

$$I^{(1)} = 3I_0 = 3 \frac{115000}{\sqrt{3} \cdot 18,43} = 10800 \text{ А.}$$

Короткое замыкание в точке K-2

Трехфазное:

$$x_{1,\Sigma} = 5,54 + 12 = 17,54 \text{ Ом};$$

$$I^{(3)} = \frac{115000}{\sqrt{3} \cdot 17,54} = 3790 \text{ А.}$$

Однофазное:

$$x_{0,\Sigma} = (8,82 + 24 + 9) / (11 + 4,95) = 13,65 \text{ Ом};$$

$$x_{\Sigma}^{(1)} = 2 \cdot 17,54 + 13,65 = 48,73 \text{ Ом};$$

$$I^{(1)} = 3I_0 = 3 \frac{115\,000}{\sqrt{3 \cdot 48,73}} = 4090 \text{ А.}$$

Пример 25. Определить ток двухфазного к. з. на шинах 6,3 кВ за трансформатором 25 МВ·А и токи при этом повреждении со стороны обмотки высшего напряжения 115 кВ данного трансформатора (рис. 48, а). Схема соединения обмоток трансформатора Y/Δ-11.

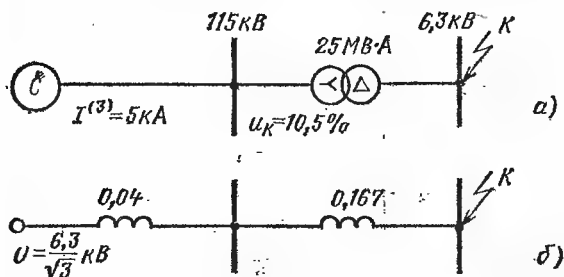


Рис. 48. Схемы к примеру 25.

а — расчетная схема сети; б — схема замещения прямой (обратной) последовательности.

Решение начинаем с составления схем замещения прямой (обратной) последовательности, которые условно совмещаем (см. рис. 48, б).

В качестве базового выбираем напряжение $U_6 = 6,3 \text{ кВ}$.

Ток двухфазного к. з. на шинах 6,3 кВ определяем по (94):

$$I_{6,3}^{(2)} = \frac{6300}{2 \cdot 0,207} = 15\,200 \text{ А.}$$

На основании рис. 42 с учетом коэффициента трансформации по (19) на стороне 115 кВ трансформатора при двухфазном к. з. на 6,3 кВ будут протекать токи: в одной фазе

$$\frac{2}{\sqrt{3}} I_{6,3}^{(2)}, \quad \text{в двух других} \quad \frac{1}{2} I_{6,3}^{(3)},$$

$$I_{115(1\phi)}^{(2)} = 15\,200 \frac{6,3}{115} \frac{2}{\sqrt{3}} = 960 \text{ А и } I_{115(2\phi, 3\phi)}^{(2)} = 480 \text{ А.}$$

Пример 26. В режиме опробования схемы рис. 49, а при отключенной энергосистеме вычислить токи трехфазного, двухфазного и однофазного к. з. на стороне 115 кВ трансформатора блока 80 МВ·А $Y_0/\Delta-11$ и токи со стороны генератора 60 МВт, 10,5 кВ при указанных видах к. з.

Схемы замещения см. рис. 49, б, в, г.

В качестве основной ступени напряжения принимаем $U_0 = 10,5$ кВ.

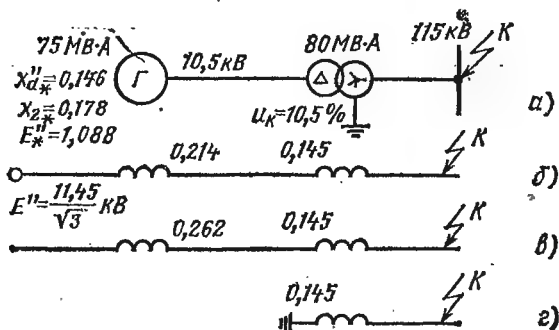


Рис. 49. Схемы к примеру 26.

а — расчетная схема сети; схемы замещения: б — прямой; в — обратной; г — нулевой последовательности.

Вычисления токов к. з. на стороне 115 кВ трансформатора производим: трехфазного по (50) и (19); двухфазного по (93) и (19) и однофазного по (97) и (19):

$$I_{115}^{(3)} = \frac{11,45}{\sqrt{3 \cdot 0,359}} \cdot \frac{10,5}{115} = 1,68 \text{ кА};$$

$$I_{115}^{(2)} = \frac{11,45}{0,766} \cdot \frac{10,5}{115} = 1,365 \text{ кА};$$

$$I_{115}^{(1)} = \frac{11,45 \sqrt{3}}{0,911} \cdot \frac{10,5}{115} = 1,99 \text{ кА}.$$

Ток трехфазного к. з. в цепи генератора равен:

$$I_{10,5}^{(3)} = \frac{11,45}{\sqrt{3 \cdot 0,359}} = 18,4 \text{ кА}.$$

Токи двухфазного и однофазного к. з. в схеме генератора определяем, исходя из произведенных расчетов, а также на основании рис. 43—44

$$I_{10,5(1\phi)}^{(2)} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{11,45}{0,766} = 17,3 \text{ кА};$$

$$I_{10,5(2\phi, 3\phi)}^{(2)} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{11,45}{0,766} = 8,65 \text{ кА};$$

$$I_{10,5}^{(1)} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{11,45 \sqrt{3}}{0,911} = 12,6 \text{ кА}.$$

13. ПРОВЕРКА АППАРАТОВ И ПРОВОДНИКОВ ПО ТОКАМ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Ознакомившись с расчетами токов к. з., используем полученные знания для проверки аппаратов и проводников на подстанции.

Пример 27. На существующей подстанции с двумя трансформаторами типа ТРДН мощностью 40 МВ·А и некомплектным распределительным устройством 10 кВ произведена замена трансформаторов на трансформаторы того же типа мощностью 63 МВ·А.

Требуется определить ток трехфазного к. з. и ударный ток на секции шин 10 кВ в новых условиях схемы рис. 50, а и проверить электродинамическую и термическую стойкость оборудования высокого напряжения, ошиновки, а также термическую стойкость кабельных вводов в ячейках присоединений 10 кВ.

В качестве расчетной ступени напряжения принимаем $U_0 = 10,5 \text{ кВ}$.

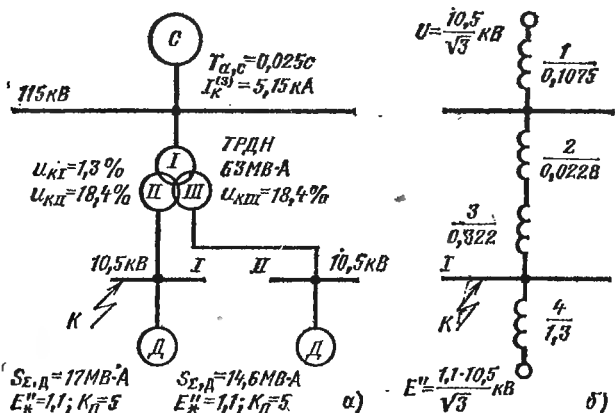


Рис. 50. Схемы к примеру 27. а — расчетная схема сети; б — схема замещения.

Сопrotивления элементов расчетной схемы:

$$x_1 = \frac{10,5}{\sqrt{3}} \frac{10,5}{5,15 \cdot 115} = 0,1075 \text{ Ом};$$

$$x_2 = \frac{0,013 \cdot 10,5^2}{63} = 0,0228 \text{ Ом};$$

$$x_3 = \frac{0,184 \cdot 10,5^2}{63} = 0,322 \text{ Ом};$$

$$x_4 = \frac{0,2 \cdot 10,5^2}{17} = 1,3 \text{ Ом}.$$

В связи с тем что на основании § 5 электродвигатели секции II не учитываются, результирующее сопротивление энергосистемы при к. з. на секции I равно:

$$x_{\Sigma} = 0,1075 + 0,0228 + 0,322 \approx 0,452 \text{ Ом}.$$

Ток к. з. от энергосистемы в месте к. з. на секции I

$$I_c = \frac{10500}{\sqrt{3} \cdot 0,452} = 13,4 \text{ кА}.$$

Ток от синхронных электродвигателей I секции в месте и. в.

$$I_d = \frac{1,1 \cdot 10500}{\sqrt{3} \cdot 1,3} = 5,13 \text{ кА}.$$

Определение ударного тока $i_{уд}$. Расчет выполняем по (64), (65) и (68).

Ударный коэффициент от энергосистемы на шинах 10,5 кВ:

Активное сопротивление заданной энергосистемы 115 кВ ($I_{с115} = 5,15 \text{ кА}$) вычисляем по постоянной времени $T_{a,с115} = 0,025 \text{ с}$.

Активное сопротивление энергосистемы*

$$r_1 = \frac{0,1075}{314 \cdot 0,025} = 0,0137 \text{ Ом}.$$

Активное сопротивление питающего трансформатора подсчитываем, исходя из соотношения $x/r \approx 26,4$ [4]:

$$r_2 + r_3 = \frac{0,345}{26,4} = 0,0131 \text{ Ом}.$$

Суммарное активное сопротивление

$$r_{\Sigma} = 0,0137 + 0,0131 = 0,0268 \text{ Ом}.$$

* Индексация активных сопротивлений выполнена по схеме замещения рис. 50, б аналогично индексации индуктивных сопротивлений.

Постоянная времени апериодической составляющей тока к. з. энергосистемы на шинах 10,5 кВ

$$T_{a, c10,5} = \frac{0,452}{314 \cdot 0,0268} = 0,0538 \text{ с.}$$

Ударный коэффициент от тока к. з. энергосистемы

$$k_{уд,с} = 1 + e^{-\frac{0,01}{0,0538}} = 1,83.$$

Ударный коэффициент от тока к. з. синхронных двигателей.

Для синхронных двигателей типа СДН при усредненной единичной мощности 3,5 МВт ударный коэффициент равен $k_{уд,д} = 1,87$ [4].

Исходя из найденного ударного коэффициента $k_{уд,д} = 1,87$ постоянная времени затухания апериодической составляющей тока к. з. двигателей $T_{a,д}$ по (64) определяется как

$$\lg 0,87 = -\frac{0,01}{T_{a,д}} \lg e; \quad T_{a,д} = 0,0723 \text{ с.}$$

Ударный ток от энергосистемы и электродвигателей

$$i_{уд} = \sqrt{2(13,4 \cdot 1,83 + 5,13 \cdot 1,87)} = 48,2 \text{ кА.}$$

Определение импульса квадратичного тока B_k . Расчет производим по (7), (12) и (13).

Исходные данные:

$$I_{п,с} = 13,4 \text{ кА;}$$

$$T_{a, c10,5} = 0,0538 \text{ с;}$$

$$T_{a,д} = 0,0723 \text{ с;}$$

$$I_{п,д} = 5,13 \text{ кА;}$$

$$T'_d = 0,333 \text{ с [4] — для двигателей типа СДН } P_{ср} = 3,5 \text{ МВт.}$$

Время отключения к. з. $t_{отк}$ [см. (12), (13)] в данном случае складывается из времени действия защиты t_a и времени отключения выключателя t_b : $t_{отк} = t_a + t_b$.

По каталогу время отключения $t_b = 0,1$ с, откуда при заданном $t_a = 0,7 \div 1,3$ с максимальное время $t_{отк} = 1,4$ с;

$$B_{к,п} = 13,4^2 \cdot 1,4 + 2 \cdot 13,4 \cdot 5,13 \cdot 0,333 \left(1 - e^{-\frac{2 \cdot 1,4}{0,333}}\right) + 0,5 \cdot 5,13^2 \cdot 0,333 \left(1 - e^{-\frac{2 \cdot 1,4}{0,333}}\right) = 251 + 45,7 + 4,38 \approx 301 \text{ кА}^2 \cdot \text{с.}$$

В соответствии с (14)

$$T_{a,сх} = \frac{0,0538 \cdot 13,4 + 0,0723 \cdot 5,13}{13,4 + 5,13} = 0,0589 \text{ с;}$$

$$B_{K,a} = (13,4 + 5,13)^2 \cdot 0,0589 \left(1 - e^{-\frac{2 \cdot 1,4}{0,0589}} \right) \approx 20 \text{ кА}^2 \cdot \text{с};$$

$$B_K = 301 + 20 = 321 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

Проверка оборудования подстанции по токам короткого замыкания. На отходящих присоединениях 10 кВ установлены выключатели типа ВМП-10 с номинальным током 630 А, разъединители типа РВ-10/630 с номинальным током 400 и 630 А, трансформаторы тока ТПЛ-10 300/5 и 400/5; на отходящих линиях используются кабели марки ААБ-150 и ААБ-185.

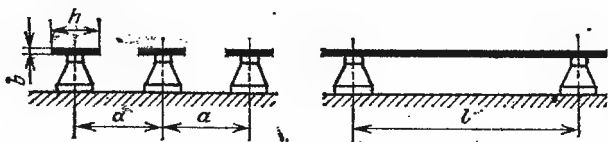


Рис. 51. Расположение шин на опорных изоляторах.

Ошиновка ячеек выполняется алюминиевыми полосами сечением $50 \times 5 \text{ мм}^2$, расположенными на изоляторах плашмя с расстоянием между осями фаз 35 см и между изоляторами 1 м (рис. 51). На подстанции применены изоляторы типа ОФ-10-375.

а) *Выключатели.* Сравним паспортные данные выключателя ВМП-10 с полученными расчетными значениями.

1) Номинальный ток отключения (наибольшее действующее значение периодической составляющей отключаемого тока) при напряжении 10 кВ $I_{\text{отк, ном}} = 20 \text{ кА}$.

Проверка тока отключения производится с учетом в отключаемом токе апериодической составляющей для времени отключения τ .

В соответствии с [4] время отключения τ определяется как сумма собственного времени отключения выключателя (по каталогу) и условного времени срабатывания релейной защиты $t_3 = 0,01 \text{ с}$.

В данном случае $\tau = 0,1 + 0,01 = 0,11 \text{ с}$.

Выключатель проходит по отключающей способности, если

$$\sqrt{2} I_{п, \tau} + i_{a, \tau} \leq \sqrt{2} I_{\text{отк, ном}}.$$

Преобразуя неравенство и записывая его для конкретных условий получим:

$$\sqrt{2} I_{п, с} \left(1 + e^{-\frac{\tau}{T_{a, с10,5}}} \right) + \sqrt{2} I_{п, д, д} \left(\frac{I_{\tau, д}}{I_{п, 0, д}} + e^{-\frac{\tau}{T_{a, д}}} \right) \leq$$

$$\leq \sqrt{2} I_{\text{отк, ном}},$$

где $I_{ц,с} = 13,4$ кА;

$T_{а,с10,5} = 0,0538$ с;

$\tau = 0,11$ с;

$I_{ц,д} = 5,13$ кА;

$I_{т,д} = 0,67 \cdot 5,13$ кА (см. рис. 26);

$T_{а,д} = 0,0723$ с.

Подставив числовые значения, убеждаемся о том, что выключатель по данному пункту удовлетворяет заводским требованиям:

$$\begin{aligned} \sqrt{2} \cdot 13,4 \left(1 + e^{-\frac{0,11}{0,0538}} \right) + \sqrt{2} \cdot 5,13 \left(0,67 + e^{-\frac{0,11}{0,0723}} \right) &< \sqrt{2} \cdot 20; \\ \sqrt{2} \cdot 13,4 (1 + 0,13) + \sqrt{2} \cdot 5,13 (0,67 + 0,219) &= \\ = \sqrt{2} \cdot 19,71 &< \sqrt{2} \cdot 20. \end{aligned}$$

2) Мгновенное значение номинального тока электродинамической стойкости

$$i_{\text{дин(ном)}} = 52 \text{ кА} > 48,2 \text{ кА}.$$

3) Ток термической стойкости восьмисекундный

$$I_{\text{тер(ном)}} = 20 \text{ кА}.$$

На основании заданных значений допустимый импульс квадратичного тока по (6) при неизменном за время $t_{\text{тер}}$ действующем значении тока $I_{\text{тер}}$ составит:

$$B_{к, \text{доп}} = I_{\text{тер}}^2 t_{\text{тер}} = 20^2 \cdot 8 = 3200 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

Максимальный импульс квадратичного тока при ликвидации к. з. на линиях 10 кВ равен $B_{к} = 321 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$.

Следовательно, условие термической стойкости $B_{к, \text{доп}} > B_{к}$ для выключателя выдерживается: $3200 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} > 321 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$.

З а к л ю ч е н и е. Установленные выключатели удовлетворяют токам к. з. в новом режиме.

б) *Разъединители.* Произведем сравнение паспортных данных разъединителей РВ-10/630 с результатами расчета токов к. з.

1) Мгновенное значение номинального тока электродинамической стойкости для разъединителей:

$$\text{при } I_{\text{ном}} = 400 \text{ А } i_{\text{дин(ном)}} = 50 \text{ кА} > 48,2 \text{ кА};$$

$$\text{при } I_{\text{ном}} = 630 \text{ А } i_{\text{дин(ном)}} = 60 \text{ кА} > 48,2 \text{ кА}.$$

2) Ток термической стойкости, четырехсекундный;

$$\text{при } I_{\text{ном}} = 400 \text{ А } I_{\text{тер(ном)}} = 16 \text{ кА};$$

$$16^2 \cdot 4 = 1024 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} > 321 \text{ кА}^2 \cdot \text{с};$$

при $I_{\text{ном}} = 630 \text{ А}$ $I_{\text{тер(ном)}} = 20 \text{ кА}$;

$$20^2 \cdot 4 = 1600 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} > 321 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

Заключение. Разъединители динамически и термически стойки.

в) *Трансформаторы тока.* Находящиеся в эксплуатации трансформаторы тока ТПЛ-10 характеризуются следующими коэффициентами электродинамической $k_{\text{дин(ном)}}$ и термической стойкости $k_{\text{тер(ном)}}$ при $t_{\text{тер}} = 4 \text{ с}$:

$$K_{\text{Т}} \dots \quad 300/5 \quad 400/5$$

$$k_{\text{дин(ном)}} \dots \quad 175 \quad 165$$

$$k_{\text{тер(ном)}} \dots \quad 45 \quad 35$$

Проверка на электродинамическую стойкость. Действительная кратность максимального тока к.з. составляет: для трансформаторов тока с $K_{\text{Т}} = 300/5$

$$k_{\text{дин}} = \frac{i_{\text{уд}}}{\sqrt{2} I_{\text{ном}}} = \frac{48,2 \cdot 10^3}{\sqrt{2} \cdot 300} = 114 < 175,$$

т.е. меньше допустимого значения;

для трансформаторов тока с $K_{\text{Т}} = 400/5$

$$k_{\text{дин}} = \frac{48,2 \cdot 10^3}{\sqrt{2} \cdot 400} = 85,2 < 165.$$

Проверка на термическую стойкость. Ток термической стойкости определяется как $I_{\text{тер(ном)}} = I_{\text{ном}} k_{\text{тер(ном)}}$, отсюда допустимый импульс квадратичного тока:

$$B_{\text{н, доп}} = (I_{\text{ном}} k_{\text{тер(ном)}})^2 t_{\text{тер}}.$$

Термическая стойкость выдерживается, если $B_{\text{н, доп}} \geq B_{\text{н}}$ для трансформаторов тока с $K_{\text{Т}} = 300/5$

$$300^2 \cdot 45^2 \cdot 10^{-6} \cdot 4 = 729 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} > 321 \text{ кА}^2 \cdot \text{с};$$

для трансформаторов тока с $K_{\text{Т}} = 400/5$

$$400^2 \cdot 35^2 \cdot 10^{-6} \cdot 4 = 784 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} > 321 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

Заключение. Установленные трансформаторы тока удовлетворяют условиям электродинамической и термической стойкости.

г) *Кабели.* Проверка проводников на термическую стойкость может выполняться тремя способами*.

Рассмотрим два из них: по допустимой температуре нагрева или по минимальному сечению,

* Средний по точности способ проверки по минимальному сечению не описывается (см. [4]).

1. Первый способ является значительно более точным, но достаточно сложным, и прибегать к нему следует для уточнения, если более простой второй способ не дает желаемого результата.

Проверкой определяется конечная температура нагрева проводника токами к. з. θ_k и сравнивается с допустимой температурой $\theta_{доп}$.

В процессе определения нагрева используется промежуточная функция f и семейство кривых $\theta = f(f)$ для различных значений $a_0 = r_0/x_\Sigma$, где r_0 — активное сопротивление данного проводника при 0°C ; x_Σ — суммарное индуктивное сопротивление до места к. з.

При $a_0 = 0$ расчет производится без учета, при $a_0 \geq 0,2$ с учетом теплового спада.

Конечное значение функции f_k зависит от ее начального значения f_n , прямо пропорционально импульсу квадратичного тока B_k и обратно пропорционально квадрату сечения проводника [4].

Начальное значение функции f_n определяется по кривым $\theta = f(f)$ исходя из θ_n начальной температуры нагрева проводника. В свою очередь θ_n зависит от температуры окружающей среды, длительно допустимой температуры при нагрузке кабеля и от отношения квадратов рабочей и длительно допустимой нагрузки проводника [4].

По расчетному значению f_k с помощью кривых $\theta = f(f)$ находится конечная температура θ_k .

Когда время отключения к. з. превышает некоторое критическое время: $t_{отк} > t_{кр}$, температура нагрева кабеля θ_k снижается введением коэффициента $\eta < 1$, учитывающего теплоотдачу [4].

2. Минимально допустимое сечение проводника по условию термической стойкости при приближенных расчетах определяется как

$$q_{min} = \frac{\sqrt{B_k}}{C},$$

где B_k — импульс квадратичного тока $A^2 \cdot c$; C — коэффициент, значение которого составляет для кабелей

с алюминиевыми жилами

6 кВ	98
10 кВ	100

с медными жилами

6 кВ	147
10 кВ	150

Для имеющихся на подстанции кабелей минимальное сечение по условию термической стойкости равно:

$$q_{min} = \frac{\sqrt{321 \cdot 10^3}}{100} \approx 179 \text{ мм}^2,$$

$$179 \text{ мм}^2 > 150 \text{ мм}^2$$

$$179 \text{ мм}^2 < 185 \text{ мм}^2.$$

Заключение. Кабели ААБ-185 термически стойки, кабели ААБ-150 — нестойки.

Для кабелей ААБ-150 была произведена дополнительная проверка по конечной температуре ϑ_k (здесь не приводится), которая показала также, что кабели не проходят по термической стойкости.

На электродинамическую стойкость кабели не проверяются.

д) Ощиповка

Проверка на электродинамическую стойкость

Предварительно подсчитывается частота собственных колебаний шинной конструкции, Гц [4]

$$f_{ш} = \frac{3,56}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}},$$

где l — длина пролета шин, м; E — модуль упругости материала шин, Па; J — момент инерции поперечного сечения шины относительно нейтральной оси сечения, перпендикулярной плоскости колебаний, $\text{м}^4 \left(\frac{bh^3}{12} \right)$; m — погонная масса шины, кг/м;

$$f_{ш} = 3,56 \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10} \cdot 5 \cdot 50^3 \cdot 10^{-12}}{12 \cdot 0,675}} = 262 \text{ Гц}.$$

При $f_{ш} > 200$ Гц расчет производится на статическую нагрузку без учета колебаний при к. з. В этом случае максимальное механическое напряжение материала однополосных шин, Па, на основании (5) при $K_\Phi = 1$ равно

$$\sigma_{расч} = \frac{F^{(3)} l}{\zeta W} = \sqrt{3} \frac{(i_{уд}^{(3)})^2 l^2}{\zeta a W} 10^{-7},$$

где $i_{уд}^{(3)}$ — ударный ток трехфазного к. з., А; W — момент сопротивления сечения, м^3 ; ζ — коэффициент, равный 10 для крайних пролетов и 12 для остальных.

Для проверяемых шин прямоугольного сечения момент сопротивления, м^3 ,

$$W = \frac{bh^2}{6} = \frac{5 \cdot 50^2}{6} \cdot 10^{-9} = 2,08 \cdot 10^{-6}.$$

Механическое напряжение при к. з.

$$\sigma_{расч} = \sqrt{3} \frac{48,2^2 \cdot 10^6 \cdot 10^{-7}}{10 \cdot 0,35 \cdot 2,08 \cdot 10^{-6}} = 55,3 \cdot 10^6 \text{ Па} < 82,3 \text{ МПа}.$$

Проверка на термическую стойкость. При определении минимального сечения шины следует исходить из позиций, изложенных в п. «г» данного параграфа, не учитывая явлений поверхностного эффекта и эффекта близости, поскольку $q_{\text{шин}} = 250 \text{ мм}^2 < 300 \text{ мм}^2$; $q_{\text{min}} = 179 \text{ мм}^2$, что меньше фактического сечения $q = 250 \text{ мм}^2$.

Заключение. Ошиновка удовлетворяет условиям электродинамической и термической стойкости.

е) *Изоляторы.* Установленные изоляторы типа ОФ-10-375 характеризуются допустимым усилием $F_{\text{доп}} = 2205 \text{ Н}$.

Расчетное усилие на изолятор при к. з. в рассматриваемом случае

$$F_{\text{расч}} = \sqrt{3} \frac{(i_{\text{уд}}^{(3)})^2 l}{a} 10^{-7} = \sqrt{3} \frac{48,22 \cdot 10^6}{0,35} \cdot 10^{-7} = 1150 \text{ Н} < 2205 \text{ Н}.$$

Заключение. Изоляторы динамически стойки.

Выводы. Произведенная проверка показала, что после замены трансформаторов с 40 на 63 МВ·А установленное на подстанции оборудование пригодно для работы в новых условиях.

Однако отходящие кабели ААБ-150 оказались термически нестойки в изменившемся режиме.

Наиболее простым выходом из создавшегося положения является снижение выдержек времени на защитах отходящих линий 10 кВ с кабелями ААБ-150 путём настройки или дополнительной установки отсечек, действующих с собственным временем 0,05—0,15 с и отстроенных по току срабатывания от шин потребителя.

ПРИЛОЖЕНИЕ.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ Э. Д. С. И ИНДУКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ НАЧАЛЬНОГО МОМЕНТА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Чтобы яснее себе представить физический процесс в момент возникновения к. з., обратимся к некоторым положениям из курса физики и электрических машин.

По закону электромагнитной индукции Фарадея изменение магнитного потока через площадь, ограниченную проводником, приводит к возникновению в этом проводнике электродвижущей силы (э. д. с.) индукции, значение которой зависит от скорости изменений магнитного потока.

В замкнутых контурах под действием наведенной э. д. с. возникают индукционные токи.

Ток, проходящий по проводнику, в свою очередь создает собственный магнитный поток, и поэтому всякое изменение тока вызывает изменение потока и наведение в проводнике э. д. с. и индуцированного ей тока. Наведение в проводнике э. д. с. за счет изменения проходящего в нем тока носит название самоиндукции. Значение э. д. с. самоиндукции пропорционально скорости изменения тока и коэффициенту самоиндукции.

Направление индукционного тока устанавливается законом Ленца. По этому закону возникающий в замкнутом контуре индукционный ток имеет такое направление, при котором его магнитное поле противодействует изменению магнитного потока, вызвавшего этот ток.

Применительно к переходным процессам в электрических машинах закон Ленца иногда называют законом постоянства потоко-сцеплений. Напомним, что потокосцеплением, или магнитным сцеплением, Ψ называется произведение магнитного потока Φ на число витков обмотки w , которую произывает этот поток: $\Psi = w\Phi$.

Магнитная связь между обмотками статора и ротора приводит к тому, что всякое изменение тока в одной из обмоток вызывает индуцированный ток в другой обмотке, который стремится поддерживать потокосцепление данной обмотки постоянным.

Рассмотрим вначале, какова физическая картина магнитного поля в синхронной машине для установившегося режима, с тем чтобы далее выяснить, как изменяются магнитные потоки при коротком замыкании.

Основной или полезный поток машины Φ_d (см. рис. П.1, а), направленный по продольной оси полюсов, создается током обмотки возбуждения. При холостом ходе машины потоком Φ_d создается э. д. с. холостого хода обмотки статора E_q . Магнитная цепь, по которой замыкается основной поток, проходит по стали ротора, воздушному зазору машины и ярму статора. Некоторая часть потока полюсов не проникает в статор, а замыкается в воздушном пространстве и стали полюсов. Эта часть потока возбуждения имену-

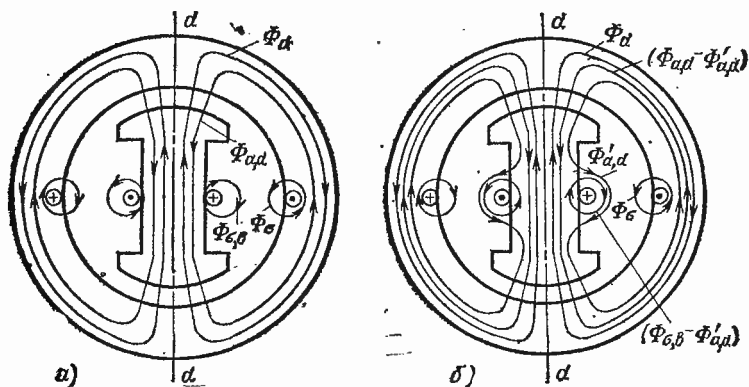


Рис. П.1. Трехфазное к. з. в симметричной цепи.

а — магнитные потоки синхронной машины для установившегося режима; б — распределение потоков для определения расчетной э. д. с.

ется потоком рассеяния ротора $\Phi_{\sigma, \text{в}}$. Полный поток возбуждения Φ_n равен сумме потоков Φ_d и $\Phi_{\sigma, \text{в}}$.

В режиме нагрузки по обмотке статора (якоря) проходит ток, вызывающий образование магнитного поля якоря. Воздействие поля якоря на основное поле обмотки возбуждения называют реакцией якоря.

В зависимости от угла сдвига между э. д. с. и током статора действие реакции якоря на поле машины будет различным. В частном случае при угле сдвига $\varphi \approx 90^\circ$, принятом для изображения магнитных полей на рис. П-1, током статора создается продольный магнитный поток реакции якоря $\Phi_{a,d}$, направленный встречно основному потоку Φ_d .

Помимо потока реакции якоря, обмоткой статора создается поток рассеяния Φ_{σ} , не попадающий в полюсы и сцепленный только с обмоткой статора.

Основной магнитный поток Φ_d , поток рассеяния ротора $\Phi_{\sigma, \text{в}}$ и поток реакции якоря $\Phi_{a,d}$ в сумме составляют результирующий маг-

нитный поток, пронизывающий обмотку возбуждения Φ_v . Очевидно, что $\Phi_v = \Phi_d + \Phi_{\sigma, v} - \Phi_{a, d}$ (рис. П.1, а).

Магнитный поток, сцепленный с обмоткой статора $\Phi_d - \Phi_{a, d}$, равный потоку в воздушном зазоре машины Φ_δ , создает в обмотке статора э. д. с. E_δ . При условии пренебрежения активным сопротивлением обмотки статора э. д. с. E_δ больше напряжения на зажимах генератора на значение падения напряжения от тока статора в индуктивном сопротивлении рассеяния статорной обмотки x_σ . Индуктивное падение напряжения в обмотке статора пропорционально потоку рассеяния статора Φ_σ .

Рассмотрим процесс возникновения к. з. и взаимодействие потоков статора и ротора при нарушении режима.

Однако предварительно отметим, что при анализе учитывается только одна слагающая действительного тока к. з. — периодическая. Как известно (§ 2), другая слагающая — аperiodическая в момент к. з. обеспечивает значение тока в цепи равным току предшествующего режима. Раздельное рассмотрение слагающих тока к. з. допустимо при отсутствии насыщения магнитной системы синхронной машины (см. § 5).

В момент возникновения к. з. за счет увеличения периодического тока статора возрастает поток реакции якоря $\Phi_{a, d}$, действующий встречно по отношению к основному потоку Φ_d .

Но поскольку обмотка ротора обладает индуктивностью, то мгновенного изменения потока, сцепленного с ней, произойти не может. По закону постоянства потокосцеплений в цепи возбуждения под влиянием э. д. с. самоиндукции возникает свободный аperiodический ток, направленный согласно с током обмотки возбуждения. Этот ток создает добавочный магнитный поток, усиливающий полезный поток полюсов Φ_d , и, кроме того, вызывает увеличение потока рассеяния ротора $\Phi_{\sigma, v}$. В сумме приращения потоков Φ_d и $\Phi_{\sigma, v}$ составляют увеличение полного потока возбуждения Φ_v , которое равняется приращению потока реакции якоря $\Phi_{a, d}$. Обозначив приращение греческой буквой Δ , получим:

$$\Delta \Phi_v = \Delta (\Phi_d + \Phi_{\sigma, v}) = \Delta \Phi_{a, d}. \quad (\text{П.1})$$

В итоге результирующий поток обмотки возбуждения Φ_v (см. выше) остается без изменения.

Благодаря рассеянию ротора поток в воздушном зазоре машины $\Phi_\delta = \Phi_d - \Phi_{a, d}$ и создаваемая им э. д. с.

E_δ уменьшаются по сравнению с предшествующими значениями так как приращение потока $\Delta \Phi_d$ по выражению (П.1) меньше приращения $\Delta \Phi_{a, d}$ на величину $\Delta \Phi_{\sigma, v}$.

Поскольку первоначальной причиной уменьшения потока Φ_δ и э. д. с. E_δ является воздействие реакции якоря на поле машины при к. з., то это свидетельствует о зависимости э. д. с. E_δ от иско-

мого тока повреждения. Таким образом, э. д. с. E_8 и индуктивное сопротивление рассеяния статора x_{σ} не могут быть использованы в качестве расчетных величин для определения тока к. з., и поэтому возникает необходимость введения других специальных расчетных понятий.

Картина магнитных потоков для определения расчетной э. д. с. показана на рис. П.1, б. Здесь поток реакции якоря $\Phi_{a,d}$ условно разделен на две составляющие: поток $\Phi_{a,d} - \Phi'_{a,d}$, проникающий в ротор, и поток $\Phi'_{a,d}$, замыкающийся по пути прохождения основного потока и путям рассеяния обмотки возбуждения. Результирующие потокоцепления статора и ротора при этом остались неизменными.

Как видно из рис. П.1, б поток $\Phi'_{a,d}$ сцеплен только с обмоткой статора. Величина потока $\Phi'_{a,d}$ пропорциональна периодическому току статора и индуктивным сопротивлениям основного потока $x_{a,d}$ и рассеяния ротора $x_{\sigma,в}$, сложенным параллельно:

$$\Phi'_{a,d} = I \frac{x_{a,d} x_{\sigma,в}}{x_{a,d} + x_{\sigma,в}}.$$

Полезный поток ротора Φ_d и часть потока реакции якоря $\Phi_{a,d} - \Phi'_{a,d}$ образуют результирующий поток ротора Φ'_d , пронизывающий обмотку статора, и дают потокоцепление со статором Ψ'_d , равное $\Psi'_d = \Psi_d - (\Psi_{a,d} - \Psi'_{a,d})$, сохраняющее свое значение при нарушениях режима. Постоянство потокоцепления Ψ'_d определяется тем, что приращение потока реакции якоря $\Delta(\Phi_{a,d} - \Phi'_{a,d})$ полностью возмещается приращением полезного потока возбуждения $\Delta\Phi_d$ т. е.

$$\Delta(\Phi_{a,d} - \Phi'_{a,d}) = \Delta\Phi_d^* \quad (\text{П.2})$$

Из (П.1) следует, что $\Delta(\Phi_{a,d} - \Phi_{\sigma,в}) = \Delta\Phi_d$; сравнивая левые части равенств (П.2) и полученное из выражения (П.1), видим, что $\Delta\Phi'_{a,d} = \Delta\Phi_{\sigma,в}$. Отсюда следует, что $\Delta(\Phi_{\sigma,в} - \Phi'_{a,d}) = 0$, т. е. при изменении режима приращение потока рассеяния ротора (см. рис. П.1, б) равно нулю и не сказывается на значении потокоцепления Ψ'_d . Значит, при заданных условиях обеспечивается независимость потокоцепления Ψ'_d от рассеяния ротора.

Из курса электротехники известно, что э. д. с. пропорциональна потокоцеплению. Электродвижущую силу, создаваемую в обмотке статора потокоцеплением Ψ'_d , также сохраняющую свое значение

* Ввиду достаточной сложности доказательства равенства не приводится.

при нарушениях режима, называют переходной э. д. с. (э. д. с. перехода от одного режима к другому). Неизменность э. д. с. E'_q в момент нарушения режима позволяет связать предшествовавший режим с новым, внезапно возникшим режимом машины.

Путем математических преобразований, которые не входят в рамки данной книги, доказывается, что

$$E'_q \approx U_{\text{ном}} + I_{\text{ном}} x'_d \sin \varphi^*. \quad (\text{П.3})$$

где E'_q — переходная фазная э. д. с. (действующее значение); $U_{\text{ном}}$ — номинальное фазное напряжение; $I_{\text{ном}}$ — номинальный ток; x'_d — переходное индуктивное сопротивление, значение которого несколько больше индуктивного сопротивления рассеяния статора x_σ за счет добавления к потоку рассеяния статора Φ_σ потока $\Phi'_{a,d}$; x'_d является параметром машины.

Исходя из E'_q , x'_d и внешнего сопротивления цепи, можно определить начальное действующее значение периодического тока или переходный ток I' .

Для машин с демпферными обмотками на роторе рассмотренные выше значения э. д. с. и сопротивления генератора для начального момента к. з. носят названия сверхпереходной э. д. с. E''_q и сверхпереходного индуктивного сопротивления x''_d . Дело в том, что в машинах с демпферными обмотками на роторе при увеличении реакции якоря индуцируются аperiodические токи как в обмотке возбуждения, так и в демпферной обмотке. Процесс к. з., характеризующийся наличием тока в демпферной обмотке, принято называть сверхпереходным; отсюда и происходят наименования величин.

Выражение для э. д. с. E''_q аналогично (П.3), но переходные величины в нем заменены сверхпереходными:

$$E''_q \approx U_{\text{ном}} + I_{\text{ном}} x''_d \sin \varphi. \quad (\text{П.4})$$

Сверхпереходное индуктивное сопротивление x''_d так же, как x'_d является параметром машины.

Поскольку x''_d меньше по значению, чем x'_d , для получения наибольшего начального значения периодической слагающей тока к. з. нужно исходить из сверхпереходных величин E''_q и x''_d т. е. использовать (П.4).

* Напряжение и ток в (П.3) являются величинами предшествующего режима машины и обычно обозначаются U_{101} и I_{101} . Придаваемые им номинальные значения, удобные для расчетной практики, следует отнести к частному случаю к. з. в номинальном режиме.

Действующее значение периодической слагающей тока к. з. для начального момента времени называется сверхпереходным током к. з. I'' и определяется по э. д. с. E_q'' , x_d'' и внешнему сопротивлению цепи. Амплитуда периодической слагающей тока к. з. для того же момента времени вычисляется как

$$i_{п.м,0} = I_{п.м,0} = I_m'' = \sqrt{2} I''.$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы. — М.: Энергия, 1970. — 520 с.
2. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. — М.: Энергия, 1964. — 704 с.
3. Ульянов С. А. Короткие замыкания в электрических системах. — М.: Госэнергоиздат, 1952. — 280 с.
4. Руководящие указания по расчету коротких замыканий, выбору и проверке аппаратов и проводников по условиям короткого замыкания. (Первая редакция). — М.: МЭИ, 1976.
5. Балтиданов Л. Н., Тарасов В. И. Электрооборудование электрических станций и подстанций. — М.: Госэнергоиздат, 1960. — 408 с.
6. Электрическая часть станций и подстанций/Под ред. А. А. Васильева — М.: Энергия, 1980. — 608 с.
7. Будзко И. А., Захарин А. Г., Эбин Л. Е. Сельские электрические сети. — М.: Госэнергоиздат, 1963. — 263 с.